

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

Инженерно-строительный институт
институт

Кафедра строительных конструкций и управляемых систем
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
С. В. Деордиев

_____ подпись _____ инициалы, фамилия

«_____»
_____ 2022г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Регулирование НДС строительных конструкций при статических и
динамических нагрузках
тема

08.04.01 «Строительство»
код и наименование направления

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

Научный руководитель _____ доцент, к. т. н. В. И. Палагушкин
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Магистрант _____ Е. В. Поляков
подпись, дата инициалы, фамилия

Рецензент _____ доцент, к. т. н. Р. А. Сабиров
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Красноярск 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ И РЕГУЛИРУЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ПРЕДНАПРЯЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	11
1.1 Основные идеи и возможности предварительного напряжения строительных конструкций.....	11
1.2 Обзор предварительно напряженных конструкций	12
Выводы по главе 1.....	17
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РЕГУЛИРОВАНИЯ НДС КОНСТРУКЦИЙ.....	18
2.1 Обзор численных методов строительных конструкций в программных комплексах.....	21
2.2 Программный комплекс ANSYS для исследования НДС комбинированной блок-фермы покрытия.....	25
Выводы по главе 2.....	29
ГЛАВА 3. ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО ПОДКРЕПЛЕНИЯ ПЛИТЫ ШПРЕНГЕЛЕМ.....	30
3.1. Расчет плиты с различными вариантами шпренгеля.....	30
3.2 Расчет преднапряженной шпренгельной плиты на статические и динамические нагрузки.....	48
Выводы по главе 3.....	73
ГЛАВА 4. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ КОМБИНИРОВАННОЙ БЛОК-ФЕРМЫ ПОКРЫТИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS.....	74

4.1 Конструкции исследуемой блок-фермы покрытия.....	74
4.2 Конечно-элементная модель комбинированной блок-фермы покрытия в программном комплексе ANSYS.....	77
4.3 Численное исследование напряженно-деформированного состояния модели комбинированной блок-фермы покрытия путем предварительного напряжения подвесок.....	80
4.4.1 Статический расчет стержневой расчетной схемы блок- фермы.....	80
4.4. 2 Статический расчет стержневой расчетной схемы блок-фермы с учетом геометрической нелинейности.....	83
4.4.3 Статический расчет стержневой расчетной схемы блок-фермы с учетом геометрической нелинейности и предварительного напряжения нижнего пояса.....	87
Выводы по главе 4.....	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	97

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. По мере собственного становления строительные конструкции улучшались, модернизировались, изобретались свежие методы их возведения. Одним из рубежей такого становления, считается регулирование НДС строительных конструкций.

Одним из способов регулирования НДС строительных конструкций является предварительное напряжение их элементов.

Предварительное напряжение, как способ регулирования напряженного состояния строительных конструкций, получил известность не так давно.

Используя преднапряжение конструкций можно снизить их массу, стоимость, возникающие деформации, а также увеличить их жесткость и устойчивость.

Разработкой металлических конструкций, в которых может применяться преднапряжение занимались такие ученые как А.В. Гадолин, Н.В. Калакуцкий, Г.Маньель, Е. И. Беленя, В. В. Бирюлев, С. Н. Клепиков, В.М. Вахуркин, А.А. Воеводин, Ю. В. Гайдаров, П. Ференчик, и др.

Также преднапряжение широко применяется и в железобетонных конструкциях. Разработкой таких конструкций занимались следующие ученые: Н.П. Абовский, Г.Маньель, В. Н. Байков, Э. Е. Силгалов, В. В. Михайлов, А. А. Гвоздев и другие.

В деревянных конструкциях, в отличие от металлических и железобетонных, преднапряжение не нашло такого широкого применения, однако исследования в этой области проводят И. С. Инжутов, П. А. Дмитриев, В. Н. Головач, В. И. Жаданов, Е. В.Тисевич, В. А. Грачев, Б. В. Накашидзе, С. Б. Турковский и другие ученые.

Отдельным видом конструкций, в которых может применяться предварительное напряжение, являются комбинированные конструкции из жестких и гибких материалов. Такие конструкции создавали и исследовали влияние в них преднапряжения В. В. Егоров, Р.В. Алдушкин, В. Н. Алехин, М. Б. Москалев и другие.

В таких конструкциях результат преднапряжения наиболее сильно заметен из-за наличия гибких элементов, преднапряжение которых позволяет перераспределить усилия во всей конструкции.

Регулировкой усилий преднапряжением элементов возможно добиться качественно новых данных пространственной блок-фермы покрытия:

- увеличить эффективность работы системы за счёт рациональной конфигурации напряжённого и деформированного состояния;

- обеспечить стабильность эксплуатационных характеристик и увеличить надёжность систем за счёт расширения их адаптивных качеств.

Цель:

- регулирование напряженно-деформированного состояния комбинированной блок-фермы покрытия преднапряжением элементов нижнего пояса при статических и динамических нагрузках.

Задачи:

- выполнить оценку современного состояния вопроса проектирования предварительно напряженных конструкций и способов эффективного регулирования напряженно-деформированного состояния конструкций, путем создания предварительного напряжения;

- создать расчетную схему пространственной блок-фермы покрытия, а также выполнить статический расчет стержневой модели в программном комплексе SCAD;

- выбор типа шпренгеля для создания наиболее эффективного НДС плиты;

- выполнить численные исследования по регулированию напряженно-деформированного состояния пространственной блок-фермы покрытия используя алгоритмы регулирования конструкций преднапряжением элементов;

- анализ полученных результатов численных исследований для дальнейшего проектирования регулируемых конструкций.

Объект исследования: пространственная блок-ферма покрытия.

Методика исследования: численное исследование с использованием алгоритма регулирования, разработанного коллективом кафедры «Строительные конструкции и управляемые системы» инженерно-строительного института СФУ совместно с программными комплексами ANSYS и SCAD.

Научная новизна работы: результаты численных исследований по регулированию напряженно-деформированного состояния пространственной комбинированной блок фермы покрытия **на действие статических и динамических нагрузок.**

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны 2021-2022» СФУ, г. Красноярск.

Публикации. Отдельные результаты исследования опубликованы в статье в сборнике международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны 2021-2022» СФУ, г. Красноярск.

Содержание работы

Во введении отражена актуальность темы диссертации, сформулированы цели и поставлены задачи исследования, также объект исследования. Отмечены научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведен обзор современного состояния проектирования предварительно напряженных и регулируемых с помощью преднапряжения конструкций.

Выполнив обзор литературы, в котором было отражен опыт проектирования предварительно напряженных строительных конструкций можно сделать следующие выводы:

Преднапряжение строительных конструкций – это одна из активно развивающихся тенденций технического развития, благодаря которой можно обеспечить более высокий технический уровень разнообразных строительных конструкций.

Преднапрягая строительные конструкции, можно добиться повышения их эффективности, снизить их стоимость, сэкономить материал, снизить вес.

Преднапряжение возможно использовать в конструкциях из различных материалов, таких как металлических, железобетонных, деревянных, различных размеров и объемов: плоскостных, пространственных, большепролетных

Наиболее эффективно применять преднапряжение в комбинированных (из различных материалов, или разной жесткости) конструкциях, таких как шпренгельные фермы, вантовые конструкции.

Во второй главе был изучен алгоритм регулирования НДС конструкций, особенности, возникающие при постановке задачи регулирования НДС, мероприятия, предшествующие выбору способа регулирования НДС конструкции, а также способы регулирования НДС конструкции.

Регулирование, осуществляется вводом в конструкцию новых параметров регулирования (регуляторов).

Регулируя НДС конструкции необходимо определиться с целями регулирования и средствами, с помощью которых это регулирование достигается.

Наиболее распространенной целью регулирования напряженно-деформированного состояния конструкций является изменение эпюры изгибающих моментов.

Из способов регулирования, в большей степени распространен метод предварительного напряжения.

Регулирование НДС конструкций может производиться на любом этапе жизненного цикла строительных конструкций.

В третьей главе был произведен выбор эффективного подкрепления плиты шпренгелем для создания наиболее эффективного НДС плиты:

- 1) Выполнен расчет плиты с различными вариантами шпренгеля;

Самым выгодным подкреплением является шпренгельная плита с 1-ым вариантом подкрепления.

2) Расчет преднапряженной шпренгельной плиты на статические и динамические нагрузки.

В четвертой главе выполнено численное исследование комбинированной блок-фермы покрытия с помощью программного комплекса ANSYS.

Для решения задачи регулирования НДС блок фермы покрытия предварительным напряжением следует выполнить следующие расчеты в программном комплексе ANSYS:

1. Статический расчет стержневой расчетной схемы блок-фермы;
2. Статический расчет стержневой расчетной схемы блок-фермы с учетом геометрической нелинейности;
3. Статический расчет стержневой расчетной схемы блок-фермы с учетом геометрической нелинейности и предварительного напряжения.

При анализе возникающих усилий и перемещений были сделаны следующие выводы:

При учете геометрической нелинейности в статическом расчете перемещения в стержневой модели уменьшились на 25,92%.

При учете геометрической нелинейности в статическом расчете напряжения в стержневой модели уменьшились (в плите на 6,27%, а в стальных элементах на 10,45%).

При учете геометрической нелинейности в статическом расчете значение максимального изгибающего момента в стержневой модели уменьшились на 4,26%.

С учетом сделанных выводов поставлена, следующая задача:

Выполнить расчет стержневой модели блок-фермы в статической постановке с учетом геометрической нелинейности и предварительным напряжением стальных элементов.

Для оценки эффективности регулирования НДС блок-фермы покрытия предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля выполнено сравнение результатов статических расчетов, а именно сравнение значений результатов общих перемещений плиты, возникающих напряжений в плите и в стальных элементах и изгибающих моментов.

Проанализировав результаты выполненного расчета, делаем выводы:

1. Перемещения плиты блок-фермы покрытия уменьшились на 29,62 %;
2. Значение максимального изгибающего момента уменьшилось на 2,87 %;
3. Максимальное напряжение в плите уменьшилось на 5,74 %, в стальных элементах шпренгеля на 10,36 %.

Удалось значительно уменьшить перемещения плиты блок-фермы покрытия, и немного уменьшить значение максимального изгибающего момента. Цель регулирования выполнена.

Этапы исследования:

Первый этап исследования – теоретический. Проведен обзор современного состояния проектирования предварительно напряженных и регулируемых с помощью преднапряжения конструкций, определена тема, цель, задачи, объекты исследования.

Второй этап исследования – аналитический. Изучен алгоритм регулирования НДС конструкций, алгоритм решения задач в программном комплексе ANSYS и SCAD, замоделирована конечно-элементная пространственная модель комбинированной блок-фермы покрытия в программном комплексе ANSYS и SCAD.

Третий этап исследования – исследовательский. Проведены численные исследования по регулированию напряженно-деформированного состояния модели комбинированной блок-фермы покрытия путем предварительного напряжения элементов нижнего пояса при статических и динамических нагрузках.

Четвертый этап работы – обобщающий. Результаты исследования обобщены, сделаны выводы, написано заключение, оформлен текст магистерской диссертации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованных источников из 24 наименований. Общий объем диссертации – 99 страниц, 71 рисунок, 7 таблиц.

Глава 1. Состояние вопроса проектирования предварительно напряженных и регулируемых с помощью преднапряжения строительных конструкций

1.1 Основные идеи и возможности предварительного напряжения строительных конструкций

В современном мире имеется довольно большой опыт по применению и проектированию плоскостных и пространственных систем, в коих применяется метод предварительного напряжения.

Предварительное напряжение и регулирование усилий является мощным средством повышения эффективности строительных конструкций, снижения их стоимости и экономии материала.

Преднапряжение возможно применять в системах из всевозможных материалов, таких как металлических, железобетонных, деревянных, различных размеров и объемов: плоскостных, пространственных, большепролетных. Более эффективно применять преднапряжение в комбинированных (из различных материалов, или же различной жесткости) конструкциях, таких как вантовые системы, шпренгельные фермы и др.

Предварительно напряженные металлические конструкции – это конструкции, в которых напряжения от расчетной нагрузки складываются с дополнительными напряжениями, искусственно разработанными разными методами в период изготовления, монтажа или же эксплуатации системы. В отличие от обычных, где напряжения появляются лишь только от расчетной нагрузки, в сечениях предварительно напряженных конструкций принудительно формируются новые напряжения или до работы системы, либо в этап ее работы под нагрузкой. При этом напряжения в наиболее загруженных сечениях имеют чаще всего иной знак, чем от нагрузки.

Предварительно напряженные железобетонные конструкции - строительные изделия, бетон которых на этапе создания принудительно получает начальную расчетную напряженность сжатия.

Она формируется за счет предварительного формирования напряжения растяжения в рабочей высокопрочной арматуре и обжата ею бетона на тех участках, которым предстоит испытывать растяжение (прогиб) при эксплуатации. Сжимаясь, арматура не проскальзывает, так как сцеплена с материалом или удерживается анкерным закреплением арматуры на торцах изделий. Таким образом, напряжение растяжения, которое приобретает железобетонный состав с помощью армирования, уравнивает напряженность заблаговременного обжата камня.

Использование предварительного напряжения в строительных конструкциях является одним из направлений технического прогресса, обеспечивающим качественно более высокий технический уровень конструкций.

1.2 Обзор предварительно напряженных конструкций

Идеи использования строителями предварительного напряжения известны с давних пор. Еще в древние времена строители римских триумфальных арок давали дополнительную сжимающую нагрузку на пилоны, чтобы погасить растягивающие напряжения от распора арок.

Создание напряженного состояния в конструкции на стадии изготовления, когда знак напряжения в материале противоположен знаку напряжений от эксплуатационной нагрузки, является одним из крупнейших достижений инженерной мысли XX века.

Применение предварительного напряжения сыграло большую роль в развитии железобетона. Оно создало качественно новый материал и позволило железобетонным конструкциям найти новые области применения, существенно облегчило вес конструкций.

Применение предварительного напряжения также открывает больше возможности в повышении эффективности металлических конструкций.

Одним из основателей теории - применения предварительного напряжения в стальных конструкциях является проф. Гентского университета (Бельгия) Г. Маньель. Он не только положил начало теории, но и провел лабораторные испытания опытных конструкций и применил предварительное напряжение в реальном строительстве. По его проекту и под его непосредственным руководством построены предварительно напряженные двухпролетные фермы большого ангара (рисунок 1.1). Он же провел испытание этой фермы в натуральных условиях.

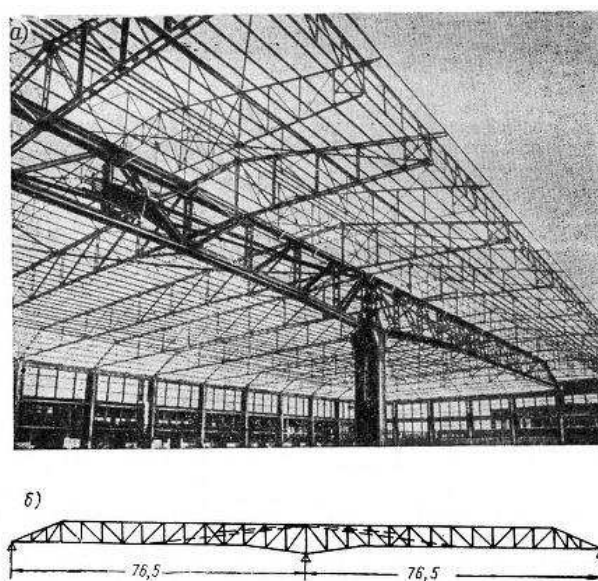


Рисунок 1.1 – Двухпролетная ферма Г. Маньеля;

а) общий вид; б) схема

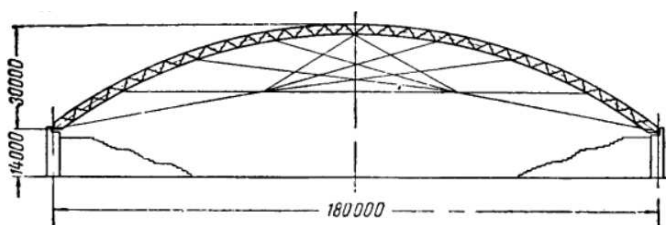
Главная двухпролетная предварительно-напряженная ферма с пролетами по 76,5 м поддерживает однопролетные с консолями фермы размером пролета 49 м и консолью 17 м. Главная ферма предварительно напряжена четырьмя наклоненными затяжками, соединяющими узлы в пролетах фермы со средней опорой. Каждая затяжка состоит из двух пучков высокопрочной проволоки диаметром 7 мм по 64 проволоки в пучке. Экономия металла составила 12% и стоимости 6%.

Дальнейшее исследование в области преднапряжения металлических конструкций шло и развивалось благодаря разработкам таких Советских ученых, как Е. И. Беленя, В. В. Бирюлев, В.М. Вахуркин, Ю. В. Гайдаров, С. Н. Клепиков и др., так и зарубежных: М. Тохачек, П. Ференчик и др.

Академик В.Г. Шухов, всегда в своих практических работах искавший новые эффективные решения, осуществил в перекрытии здания ГУМа в Москве легкие арки, усиленные предварительно натянутыми струнами (рисунок 1.2).

Предварительное натяжение струн создало для арки четыре дополнительные опоры, способные работать как на растяжение, так и на сжатие, и значительно увеличило жесткость и устойчивость арок. Восьмилепестковый купол В.Г. Шухов спрятал за фасадом здания. Обилие стекла придает зданию ощущение легкости, хотя на строительство перекрытий ушло 800 тонн металла. Ажурный стальной каркас из металлических стержней стал настоящим произведением искусства.

а)



б)



Рисунок 1.2 – Усиление арок предварительно натянутыми струнами;
а) предложение ГПИ Проект сталь конструкция; б) покрытие ГУМа

В строительстве достаточно часто применяются комбинированные конструкции, то есть конструкции, выполненные одновременно из жестких и гибких материалов. В таких конструкциях результат преднапряжения наиболее сильно заметен, так как наличие гибких элементов позволяет исключить добавление дополнительных напрягающих элементов. Помимо этого, изменяя усилия в гибких элементах, возможно регулировать усилия во всех элементах конструкции. Благодаря этому снижается вес конструкции.

Купольные конструкции, радиомачты, преднапряженные шпренгельными, преднапряженные стрелы кранов, вантовые фермы – это далеко не полный перечень комбинированных преднапряженных конструкций.

В. В. Егоров предложил конструктивные формы комбинированных систем с применением предварительного напряжения. Одно из таких технических решений «представляет собой предварительно напряженную шпренгельную ферму, состоящую из балки - распорки и основного шпренгеля» (рисунок 1.3), которое позволяет повысить жесткость и устойчивость системы при условии загрузки части пролета. На шпренгельной ферме, в пределах ее внешних габаритов, установлены дополнительные парные шпренгеля, включающие гибкие затяжки с натяжными устройствами. При изгибе шпренгельной системы затяжки шпренгелей препятствуют перемещениям системы.

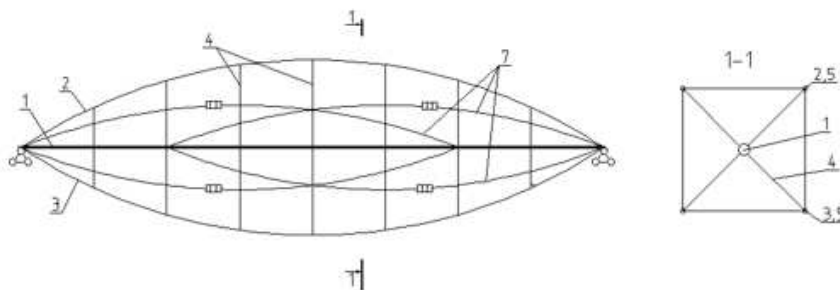


Рисунок 1.3 – Преднапряженная шпренгельная ферма.

- 1 – балка-распорка; 2,3 – верхние и нижние затяжки основного шпренгеля; 4– шпренгель; 5 – направляющие; 6 – связевые элементы;
7 – затяжки дополнительных шпренгелей

Кандидат технических наук, Р.В. Алдушкин разработал новую вантово-стержневую систему с преднапряженными элементами (рисунок 1.4). Данная система состоит из несущего троса и соединенной с ним балки жесткости. Балкой жесткости служит ферма со стойками, расположенными на одинаковом расстоянии друг от друга, раскрепленные раскосами. Высота стоек пропорциональна ординатам эпюры моментов, которая построена в балке с таким же пролетом, что и ферма под действием равномерно-распределенной нагрузки. Несущий трос пролегает по нижнему поясу фермы и присоединяется ко всем узлам фермы шарнирно-подвижными связями.

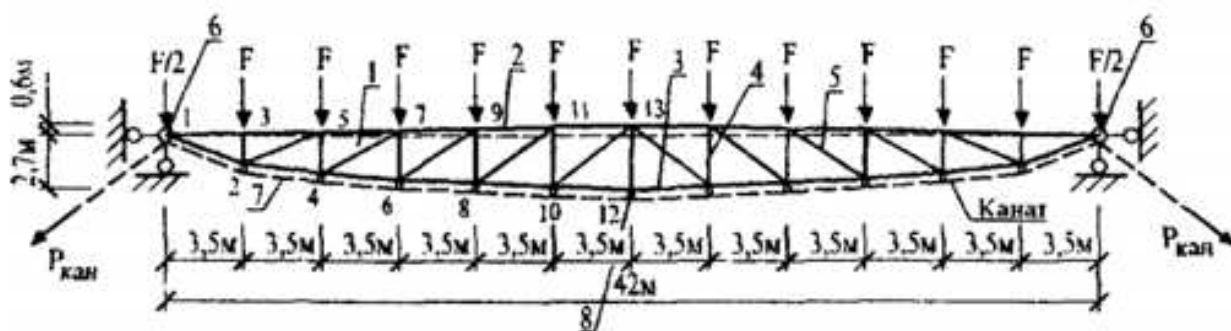


Рисунок 1.4 – Преднапряженная вантово-стержневая система

1 – балка жесткости; 2,3 – пояса, 4 – стойки; 5 – раскосы; 6 – узлы крепления системы; 7 – несущий трос; 8 – пролетные узлы

Если несущий трос преднапрячь на величину до 100 кН, то можно достичь уменьшения усилий в нижнем поясе примерно на 17%. Усилия в раскосах при этом практически исчезают, а усилия в стойках при любой величине преднапряжения остаются неизменными.

Выводы по главе 1

Выполнив обзор литературы, в котором был отражен опыт проектирования предварительно напряженных строительных конструкций можно сделать следующие выводы:

1) Преднапряжение строительных конструкций – это одна из активно развивающихся тенденций технического развития, благодаря которой можно обеспечить более высокий технический уровень разнообразных строительных конструкций.

2) Преднапрягая строительные конструкции, можно добиться повышения их эффективности, снизить их стоимость, сэкономить материал, снизить вес.

3) Одним из способов регулирования напряженно-деформированного состояния строительных конструкций является предварительное напряжение их элементов.

4) Преднапряжение возможно использовать в конструкциях из различных материалов, таких как металлических, железобетонных, деревянных, различных размеров и объемов: плоскостных, пространственных, большепролетных

5) Наиболее эффективно применять преднапряжение в комбинированных (из различных материалов, или разной жесткости) конструкциях, таких как шпренгельные фермы, вантовые конструкции.

Глава 2. Методология решения задач регулирования НДС конструкций

Регулирование напряжённо-деформированного состояния конструкции - это целенаправленное воздействие посредством различных технических приёмов на те или иные характеристики механического поведения или состояния объекта (сооружения, конструкции или их элементов) с целью получения выгодных по некоторому заранее принятому критерию значений этих характеристик.

Регулируемые параметры - подлежащие улучшению характеристики объекта.

Регулирующие параметры (регуляторы) - величины, за счёт изменения которых осуществляется воздействие на НДС объекта и его характеристики (в том числе на регулируемые параметры).

Критерий регулирования - общее исходное требование к результату регулирования, выраженное в качественной форме, без количественной детализации.

Условия регулирования по принятому критерию - зависимости (уравнения), выражающие цель регулирования, которым должны удовлетворять значения регулируемых параметров в результате решения задачи.

При решении задач регулирования напряженно-деформированного состояния любых конструкций необходимо следовать определенным этапам (рисунок 2.1).

Анализ исходной расчетной схемы конструкции и способов ее регулирования является важной частью решения задачи.

Прежде чем приступить к решению задачи регулирования, необходимо выяснить:

- какие виды деформаций возникают в элементах рассматриваемых конструкций (изгиб, растяжение или сжатие, сдвиг, кручение) на различных стадиях их существования;

- насколько равномерно или неравномерно распределяются усилия (напряжения) в поперечных сечениях разных элементов; есть ли элементы, в которых материал слабо напряжен, т. е. используется неэффективно;

- в каких элементах возникают максимальные усилия (напряжения); • какие поперечные сечения являются опасными (расчетными при подборе сечения);

- какое НДС желательно создать в конструкции;

- каковы исходные данные задачи (нерегулируемые параметры);

- какие из параметров можно перевести в разряд регулируемых.

После анализа необходима выполнить поставку задачи регулирования, которая требует глубокого понимания работы конструкции как для формирования желаемых условий, которым должна удовлетворять конструкция, так и для выбора варьируемых параметров. Необходимо выбрать регулируемые параметры и критерии регулирования.

В качестве критериев регулирования могут быть приняты следующие: равенство усилий в опасных сечениях, уменьшение величин некоторых факторов и др. Из набора возможных средств регулирования важно выделить наиболее эффективные.

Для ответа на поставленные вопросы необходимо сделать расчет конструкции. После этого проводим анализ и смотрим, какие сечения напряжены больше, какие недонапряжены и какое напряженное состояние конструкции желательно (какое перераспределение усилий необходимо сделать, какие при этом способы (средства) регулирования могут быть наиболее эффективны.

Следует отметить, что не каждое средство регулирования приводит к желаемому результату, т.е. задача может и не иметь решения при данном способе регулирования.

Часто задачи регулирования решаются путем последовательного перебора регуляторов.

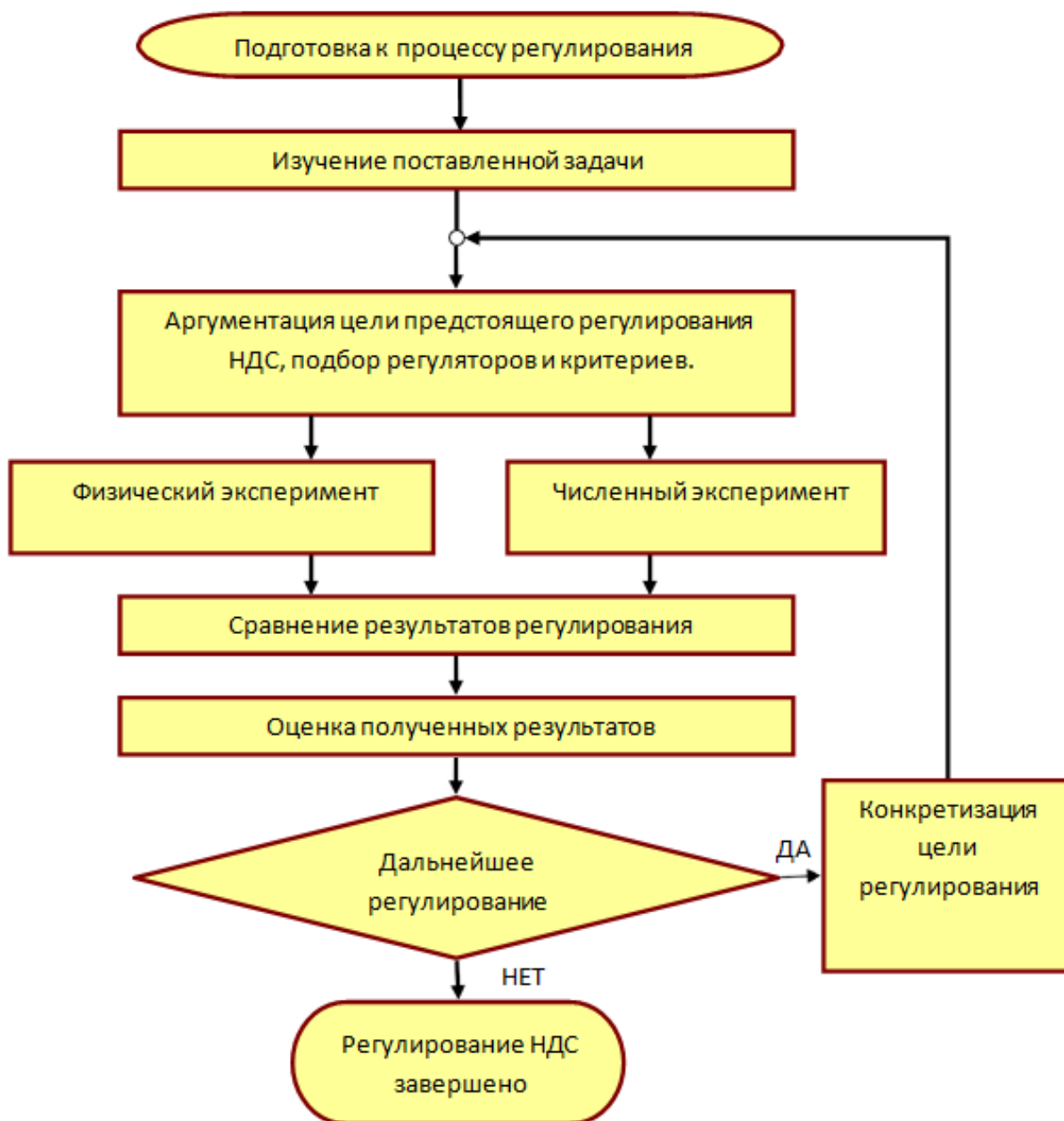


Рисунок 2.1 – Алгоритм регулирования НДС конструкций

2.1 Обзор численных методов строительных конструкций в программных комплексах

Исследование краевых задач (систем уравнений с начальными и граничными условиями) в силу своей сложности не позволяет использовать аналитические способы решения.

В настоящий момент лидирующие позиции в дискретизации краевых задач занимает метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий решать широкий комплекс задач математического моделирования в различных областях.

В настоящее время этот метод, называемый методом конечных элементов (МКЭ), принадлежит к числу наиболее распространенных способов приближенного решения дифференциальных уравнений.

Впервые математические основы этого метода были сформулированы Р. Курантом в 1943г. Термин «конечный элемент» первым ввел Р. Клаф в 1960 г. Впоследствии метод, предложенный Курантом, был переоткрыт инженерами, существенно развит и обобщен. Развитие метод получил благодаря таким ученым как К. Батэ, Е. Вилсон, О. Зенкевич и др., работы которых стали классикой в области численных методов механики.

В основе метода лежит идея аппроксимации непрерывной функции дискретной моделью, построенной на множестве кусочно-непрерывных функций, каждая из которых определена на конечном числе подобластей - конечных элементов. Исследуемая область дробится на элементы, и на каждом из них неизвестная функция аппроксимируется определенной функцией (как правило эта функция является полиномом). Эти функции должны удовлетворять граничным условиям непрерывности, совпадающим с граничными условиями, налагаемыми самой задачей. Выбором аппроксимирующей функции для каждого элемента определяется его тип элемента.

Большинство современных универсальных и специализированных программных комплексов построено на базе МКЭ. В них, как правило, представлены инструменты для решения пространственных задач в статической и динамической постановках. МКЭ уверенно сохраняет свои лидирующие позиции при комплексном анализе комбинированных систем, включающих стержневые, плитно-оболочечные и объемные элементы.

Использование современных компьютерных технологий позволяет достичь высоких практических и экономических результатов в различных областях промышленности.

На данный момент существует более сотни программных комплексов, нацеленных на решение задач строительства.

Наиболее распространенная классификация программного обеспечения складывается исходя из целей, которые достигаются в процессе использования программных продуктов. Так, можно выделить две общие группы комплексов: САД-системы (Computer-Aided Design) и САЕ-системы (Computer Aided Engineering). САД-системы - программные комплексы, предназначенные для автоматизации процесса проектирования (Auto CAD, Revit, SolidWorks, Компас).

САЕ-системы- это разнообразные программные продукты, позволяющие при помощи расчётных методов оценить, как поведёт себя компьютерная модель изделия в реальных условиях эксплуатации. Моделирование и анализ разнообразных физических процессов, таких как нагружение балки, разрушение конструкции и др. Большинство современных САЕ-систем основано на полных математических моделях, представляющих собой системы уравнений в частных производных, которые решаются с помощью методов конечных разностей, конечных объемов (МКО) и конечных элементов (МКЭ). Довольно-таки часто САД- и САЕ-системы используются как дополняющие друг друга этапы процесса проектирования.

Современные программные комплексы имеют обширные библиотеки конечных элементов включающие: стержневые (прямо- и криволинейные), двумерные (для моделирования плоского напряженного, плоского деформированного или осесимметричного состояния), плитные (одно- и многослойные, тонко-, средне- и толстостенные) и оболочечные (постоянной и переменной толщины), трехмерные (объемные) конечные элементы. Разнообразие конечных элементов дают возможность моделировать различные характеристики и напряженно-деформированное состояние исследуемых систем в разных постановках: плоской, осесимметричной или трехмерной.

Самые известные САЕ-комплексы, которые позволяют решать задачи проектирования и исследования строительных конструкций, зданий и сооружений, это – ABAQUS, ANSYS, NASTRAN, и т. д. В России распространено применение программные комплексы, основанные на МКЭ, такие, как SCAD и Лира.

SCAD: вычислительный комплекс для прочностного анализа конструкций с помощью МКЭ. Программный комплекс позволяет производить расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций из различных материалов, включая стержневые, пластинчатые, твердотельные и комбинированные конструкции. Неоспоримыми преимуществами данного комплекса для российских проектировщиков являются его локализация в соответствии с российскими стандартами проектирования и наличие русскоязычной версии. Стоит заметить, что на данный момент программный продукт имеет ограниченный набор технологий учета нелинейных свойств материалов, а также не позволяет решать задачи механики жидкости и газа, что существенно при определении ветровых нагрузок на здания, проектировании систем вентиляции и т. д.

Лира: многофункциональный программный комплекс для расчета и проектирования строительных и машиностроительных конструкций различного назначения.

Главным достоинством программы является наличие инструментов конструирования железобетонных и стальных элементов в соответствии с нормативами стран СНГ, Европы и США, а также возможность получения рабочих чертежей конструкции механизмов (маркировочные схемы, ведомости элементов, узлы, спецификации) в среде AutoCAD в автоматизированном режиме. С помощью программы выполняются расчеты НДС конструкций, динамические и сейсмические расчеты и т. д. Возможность суперэлементного моделирования позволяет эффективно решать задачи большой размерности.

NASTRAN: конечно-элементный ПК, позволяющий проводить расчеты НДС конструкций, собственных частот и форм колебаний, устойчивости, критических частот и вибраций роторных машин, исследовать динамические и нелинейные процессы, сложные контактные взаимодействия, аэроупругость, а также решать тепловые задачи и задачи акустики.

ABAQUS: конечно-элементный ПК, универсальная система общего назначения, предназначенная для проведения многоцелевого, инженерного, междисциплинарного анализа в областях общей механики и геомеханики, машиностроения, автомобилестроения, электроники, металлургии, нефтедобычи и переработки.

MIDAS: позволяет выполнять проектирование и расчет уникальных объектов гражданского, промышленного и транспортного строительства. Включает набор модулей для проектирования мостовых конструкций и гражданских сооружений (MIDAS Civil), комплексных расчетов геотехнических объектов (MIDAS GTS), моделирования нелинейных процессов (MIDAS FEA), в том числе расчета устойчивости с учетом нелинейности, контактных задач, трещинообразования и т. д.

ANSYS: конечно-элементный программный комплекс, который связывает и объединяет множество приложений для расчета задач, а также имеет один из наиболее полных и эффективных инструментариев.

Программное обеспечение ANSYS позволяет проводить численный анализ задач механики сплошных сред и предоставляет широкие возможности для подготовки вычислительных геометрических и конечно-элементных моделей и последующей обработки результатов расчетов. Кроме того, программный пакет основан на эффективных алгоритмах распараллеливания, которые могут значительно сократить время расчета для сложных строительных задач.

Рассмотрим данный программный комплекс подробнее, а также будем применять его для решения задачи диссертационной работы.

2.2 Программный комплекс ANSYS для исследования НДС комбинированной блок-фермы покрытия

Программный комплекс ANSYS относится к числу лидеров в области CAE-продуктов конечно-элементного анализа и имеет огромный опыт в решении прикладных задач численными методами. В 1970 году вышла первая версия программного комплекса ANSYS. Данная версия продукта помогала проводить расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций и тепловые расчеты в стационарной постановке, с тех пор возможности программного комплекса выросли многократно. Постоянно совершенствуется графический интерфейс программы, но при этом основная логика работы в программе не менялась. Все команды представляются в основном окне в виде дерева, для построения и редактирования геометрических моделей использовались прикладные модули. Параллельно набирали развитие CAD-системы проектирования, которые представляли пользователю расширенные возможности для создания, редактирования, управления геометрическими моделями. Вопрос об интеграции отдельных программных комплексов в единую расчетную среду становился все более актуальным, ведь решение данной проблемы способствовало раскрытию всех возможностей многодисциплинарного анализа.

Начиная с 10-ой версии программного комплекса, фирма ANSYS, Inc. предложила новую платформу Workbench, которая отличалась современным графическим интерфейсом, а главное имела возможность управления отдельными модулями и продуктами ANSYS.

ANSYS Workbench - это единая интерактивная среда, интегрирующая различные программные продукты ANSYS, Inc. друг с другом, а также и с CAD-системами, имеющая модульную структуру и дающая новые возможности как в препроцессорной подготовке, так и в решении задач и обработке результатов. Основное призвание Workbench - ускорить, упростить, повысить эффективность и унифицировать постановку задач, независимо от их принадлежности к конкретной физической дисциплине и используемому решателю.

В результате этих взаимосвязей программный комплекс имеет ряд преимуществ и возможностей, а именно:

- быструю подготовку геометрии для анализа потока;
- исключение дублирования исходных данных;
- легко рассчитать несколько вариантов геометрии, сетки, физики процесса и автоматически получить новые результаты моделирования для этой серии расчетов;
- улучшать качества разрабатываемого изделия (процесса) за счет ясного понимания происходящих процессов с последующим корректным проектированием.

В данной работе при исследовании комбинированной блок-фермы покрытия используем платформу ANSYS Workbench, которая является основным компонентом, который интегрирует в единое рабочее пространство отдельные приложения, такие как Static Structural и Transient Structural и предоставляет интерфейс обмена данными между ними.

Static Structural - предназначен для решения задач механики деформируемого твердого тела в статической постановке.

Transient Structural – модуль для решения задач динамики конструкций. Основан на неявных схемах интегрирования уравнений движения.

Этапы решения задачи в общем случае могут быть описаны схемой, показанной на рисунке 2.2.

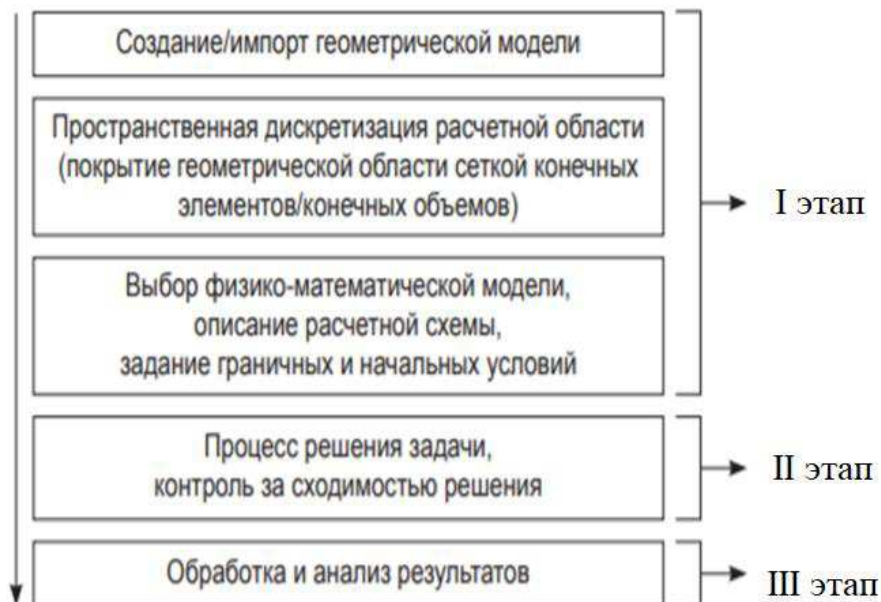


Рисунок 2.2 – Этапы решения задачи в ANSYS Workbench.

Первым этапом решения задачи является создание геометрической модели или импорт готовой модели из сторонних CAD-систем. В Workbench для этого используется модуль Geometry, который позволяет вызвать приложение Design Modeler или SpaceClaim Direct Modeler.

На втором этапе выполняется пространственная дискретизация расчетной области, которая соответствует исходной геометрической модели, полученной на предыдущем шаге. Построение расчетной сетки может быть выполнено с помощью модуля Meshing.

Далее в зависимости от типа анализа, который предполагается использовать в работе, производится описание математической модели и подбирается необходимый расчетный модуль. Например, для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции под действием статических нагрузок следует использовать модуль Static Structural.

На данном этапе необходимо задать свойства материалов, граничные и начальные условия задачи, выбрать методы расчета, настроить решатель в соответствии с принятой физико-математической моделью и задать требуемую точность расчета.

Процесс расчета является полностью автоматизированным, однако рекомендуется осуществлять контроль над процессом решения: следить за поведением решения и его соответствием критериям сходимости, выводить на экран дополнительные параметры, позволяющие оценить необходимые количественные характеристики решения, и т. д.

После завершения расчета необходимо проанализировать полученные результаты и, если есть возможность, сравнить их с имеющимися экспериментальными данными.

Выводы по главе 2

1) Регулирование НДС конструкций осуществляется вводом в конструкцию новых параметров регулирования (регуляторов).

2) Регулируя НДС конструкции необходимо определиться с целями регулирования и средствами, с помощью которых это регулирование достигается.

3) В качестве критериев регулирования могут быть приняты следующие: равенство усилий в опасных сечениях, уменьшение величин некоторых факторов и др.

4) Из способов регулирования, в большей степени распространен метод предварительногонапряжения.

5) Регулирование НДС конструкций может производиться на любом этапе жизненного цикла строительныхконструкций.

6) Лидирующие позиции в дискретизации краевых задач занимает метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий решать широкий комплекс задач математического моделирования в различных областях.

7) Большинство современных универсальных и специализированных программных комплексов построено на базе МКЭ. ABAQUS, ANSYS, NASTRAN, SCAD и Лира.

8) Решение задач в программном комплексе ANSYS делиться на три этапа. Первым этапом решения задачи является создание геометрической модели или импорт готовой модели из сторонних CAD-систем. На втором этапе выполняется пространственная дискретизация расчетной области. Далее производится описание математической модели и подбирается необходимый расчетный модуль. Процесс расчета является полностью автоматизированным. Третьим этапом является анализ полученных результатов.

Глава 3. Выбор эффективного подкрепления плиты шпренгелем.

Цель: Выбор типа шпренгеля для создания наиболее эффективного НДС плиты.

Задачи:

1. Выполнить расчет плиты с различными вариантами шпренгеля;
2. Расчет преднапряженной шпренгельной плиты на статические и динамические нагрузки.

3.1 Расчет плиты с различными вариантами шпренгеля

Рассмотрим несколько вариантов подкрепления:

Вариант подкрепления 1

Исходные данные:

Рассматривается пластинчато-стержневая система (шпренгельная плита). Расчетная схема, заданная нагрузка, геометрические и механические характеристики плиты и элементов шпренгеля приведены на (рис. 3.1).
Материал плиты бетон В30.

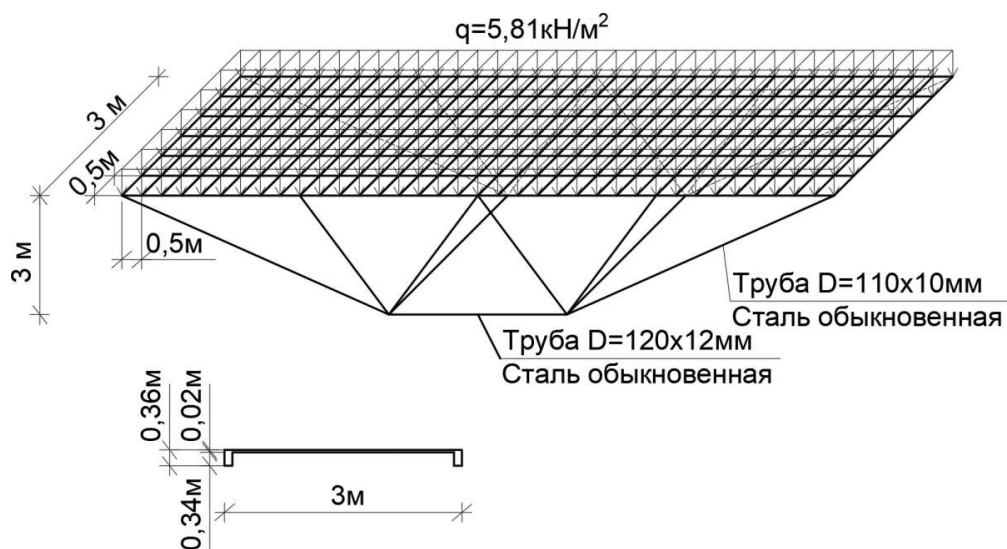


Рисунок 3.1 – Расчетная схема для 1-го варианта подкрепления

Расчет плиты на заданную нагрузку выполним по ПК SCAD. На (рис.3.2) приведена, конечно-элементная, модель шпренгельной плиты в ПК SCAD для 1-го варианта подкрепления.

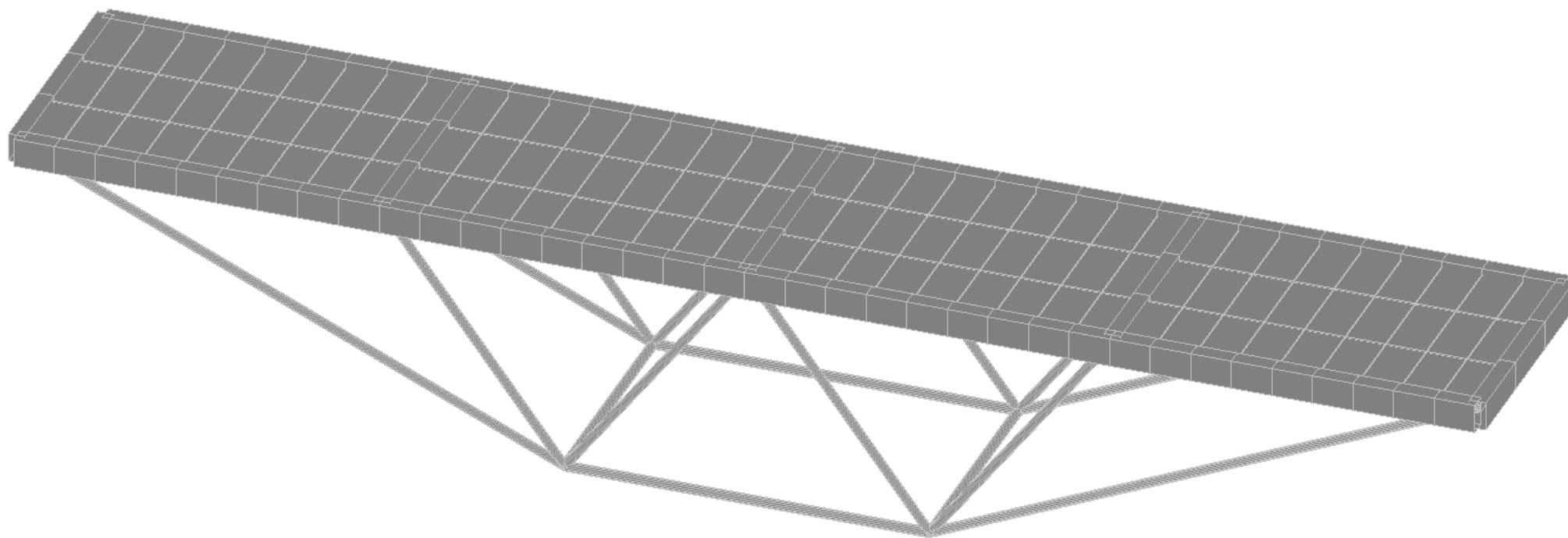


Рисунок 3.2 – Конечно-элементная модель расчетной схемы в
ПК SCAD для 1-го варианта подкрепления

Результаты расчета плиты в виде изополей изгибающих моментов M_x , эпюры изгибающих моментов M_y и величин прогибов для 1-го варианта подкрепления приведены на (рис. 3.3-3.5).

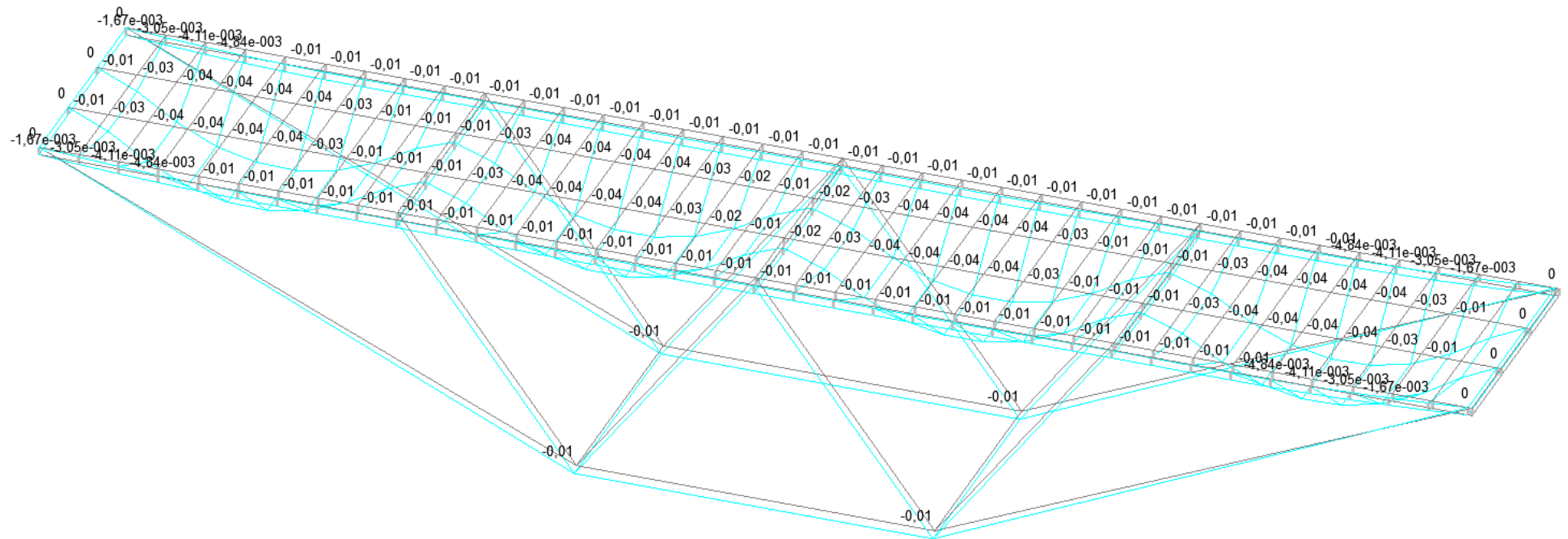


Рисунок 3.3 – Перемещения по оси z, (max 0,04 м = 40 мм) для 1-го варианта подкрепления

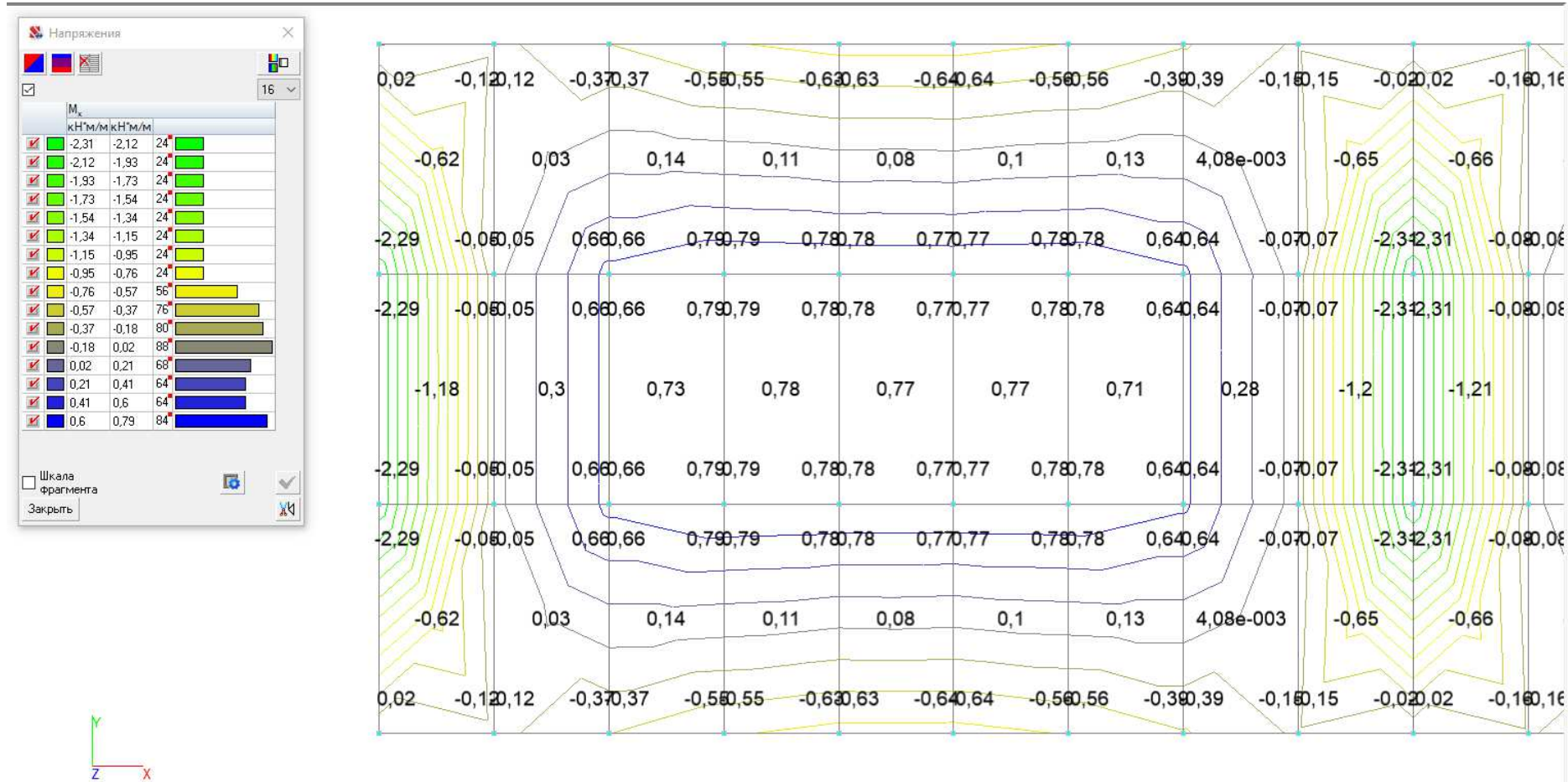


Рисунок 3.4 – Изополя M_x , (max 2,31кНм/м) для 1-го варианта подкрепления

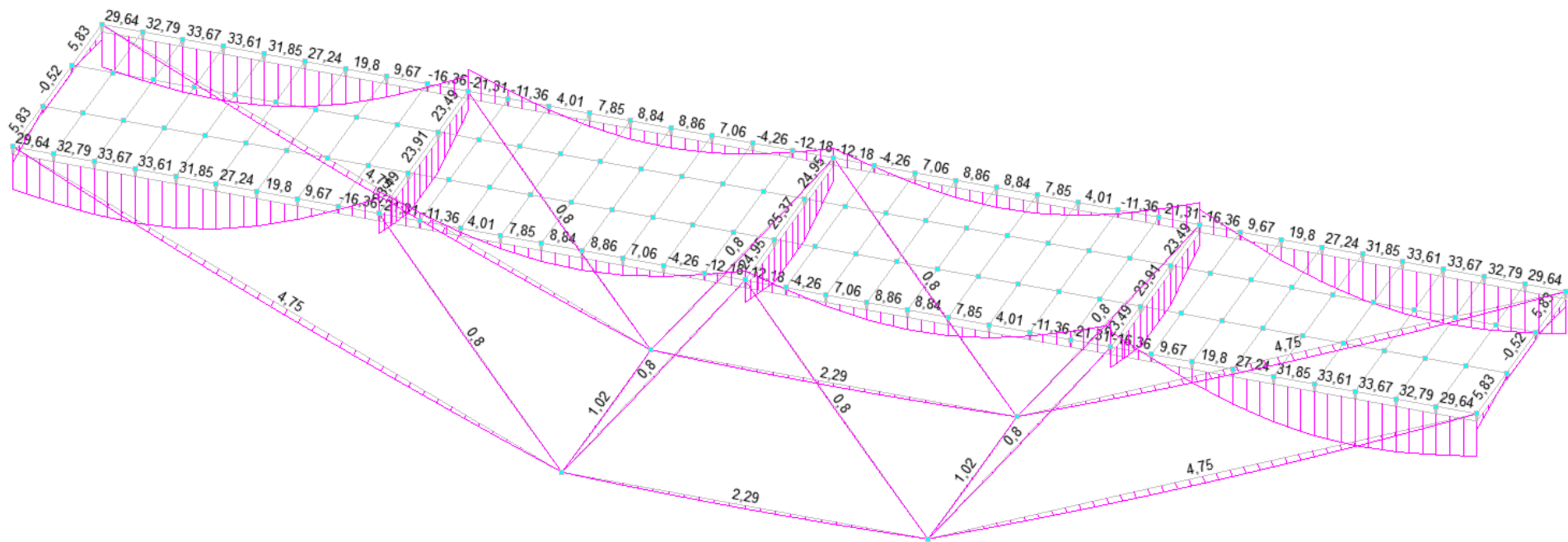


Рисунок 3.5 – Эюры изгибающих моментов M_x , (max 330,67 кН*м) для 1-го варианта подкрепления

Вариант подкрепления 2

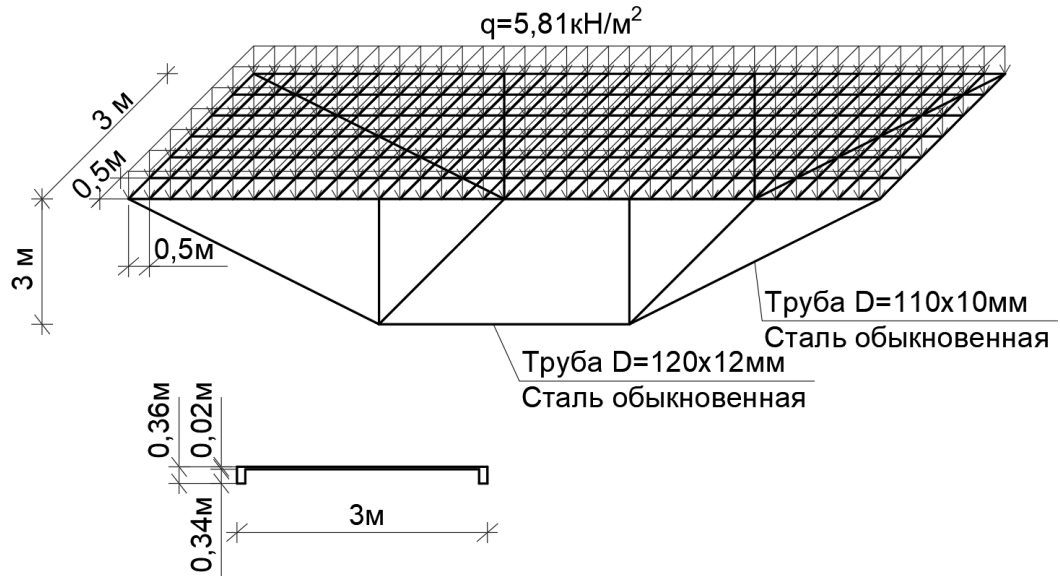


Рисунок 3.6 – Расчетная схема для 2-го варианта подкрепления

Расчет плиты на заданную нагрузку выполним по ПК SCAD. На (рис.3.7) приведена, конечно-элементная, модель шпренгельной плиты в ПК SCAD для 2-го варианта подкрепления.

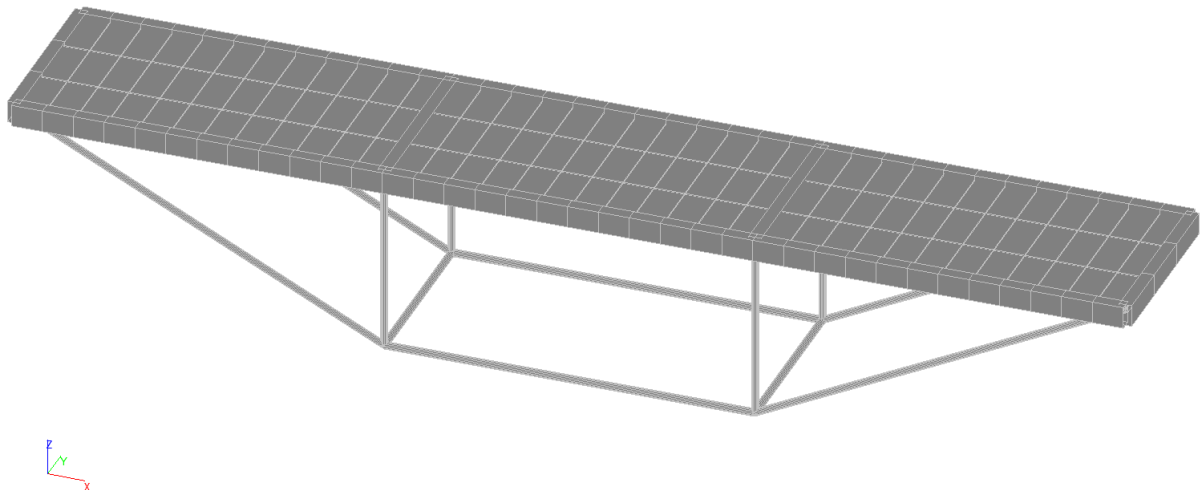


Рисунок 3.7 – Конечно-элементная модель расчетной схемы в ПК SCAD для 2-го варианта подкрепления

Результаты расчета плиты в виде изополей изгибающих моментов M_x , эпюры изгибающих моментов M_y и величин прогибов для 2-го варианта подкрепления приведены на (рис. 3.8-3.10).

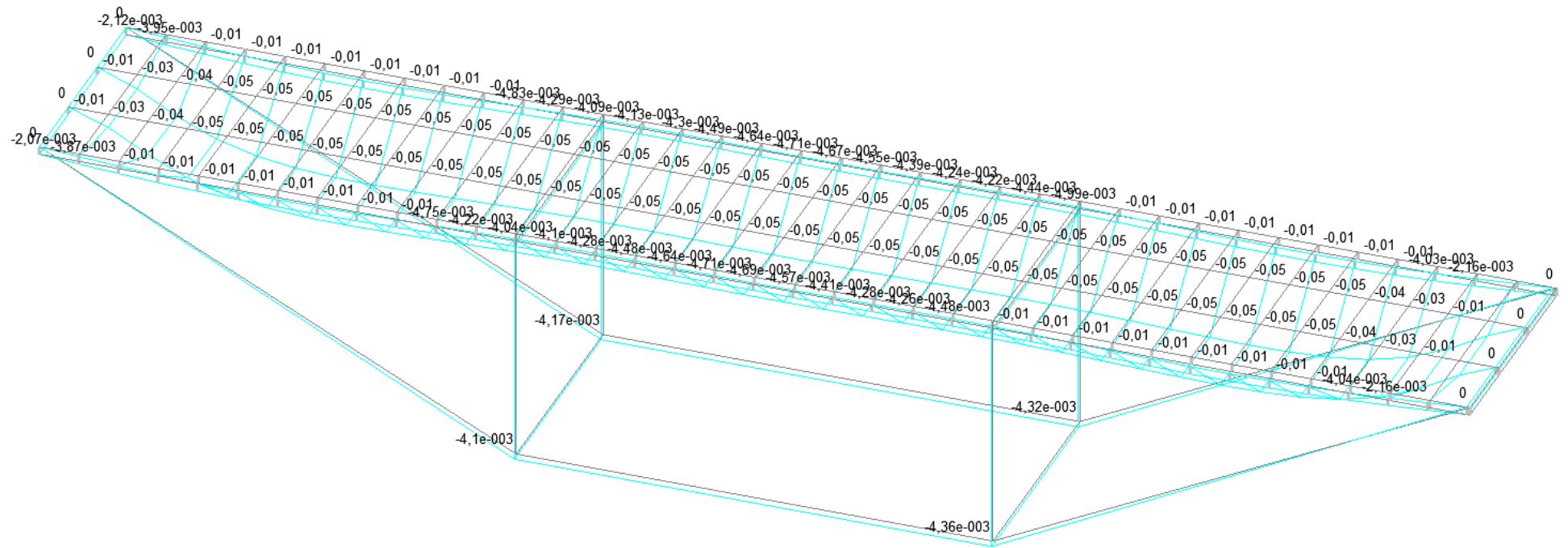


Рисунок 3.8 – Перемещения по оси z, (max $0,05$ м = 50 мм) для 2-го варианта подкрепления

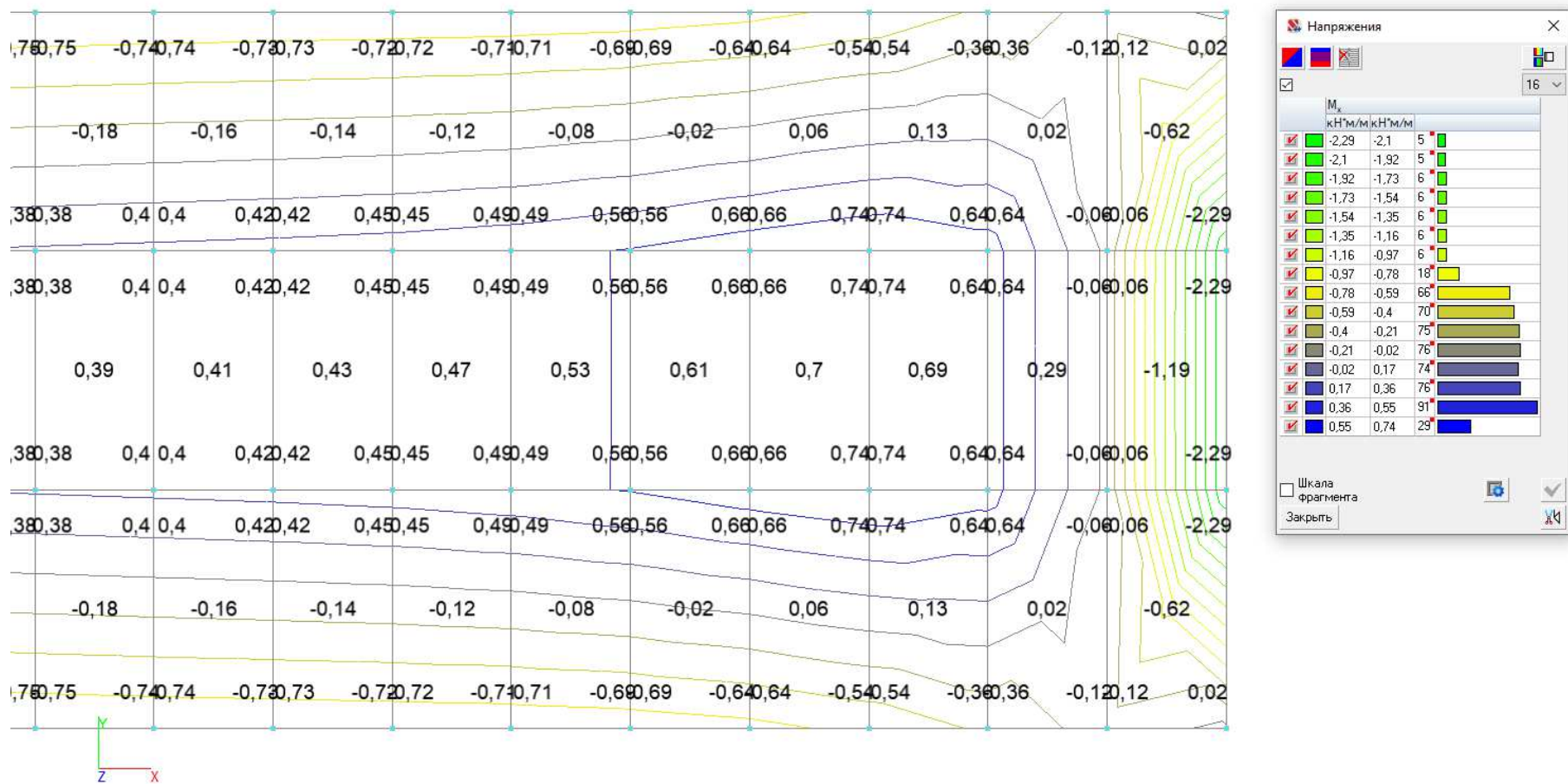


Рисунок 3.9 – Изополя M_x , (max 2,29 кНм/м) для 2-го варианта подкрепления

Вариант подкрепления 3

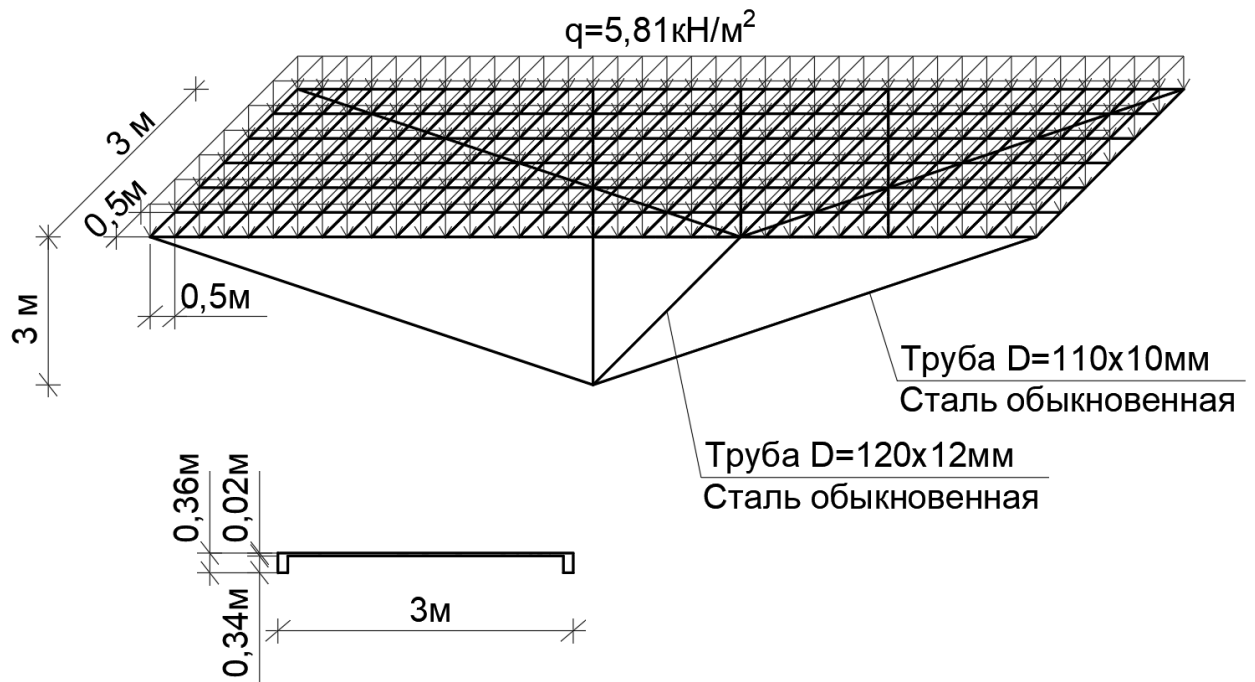


Рисунок 3.11 – Расчетная схема для 3-го варианта подкрепления

Расчет плиты на заданную нагрузку выполним по ПК SCAD. На (рис.3.12) приведена, конечно-элементная, модель шпренгельной плиты в ПК SCAD для 3-го варианта подкрепления.

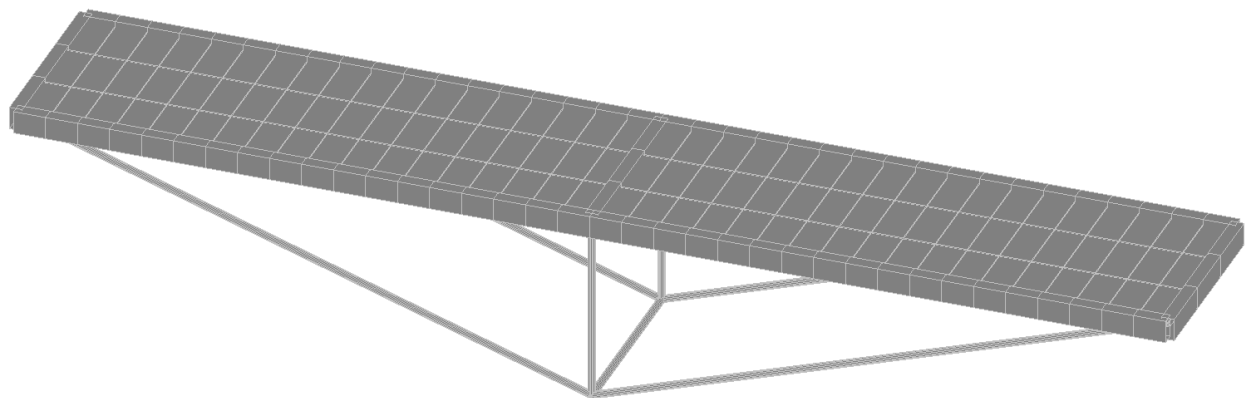


Рисунок 3.13 – Конечно-элементная модель расчетной схемы в ПК SCAD для 3-го варианта подкрепления

Результаты расчета плиты в виде изополей изгибающих моментов M_x , эпюры изгибающих моментов M_y и величин прогибов для 3-го варианта подкрепления приведены на (рис. 3.14-3.16).

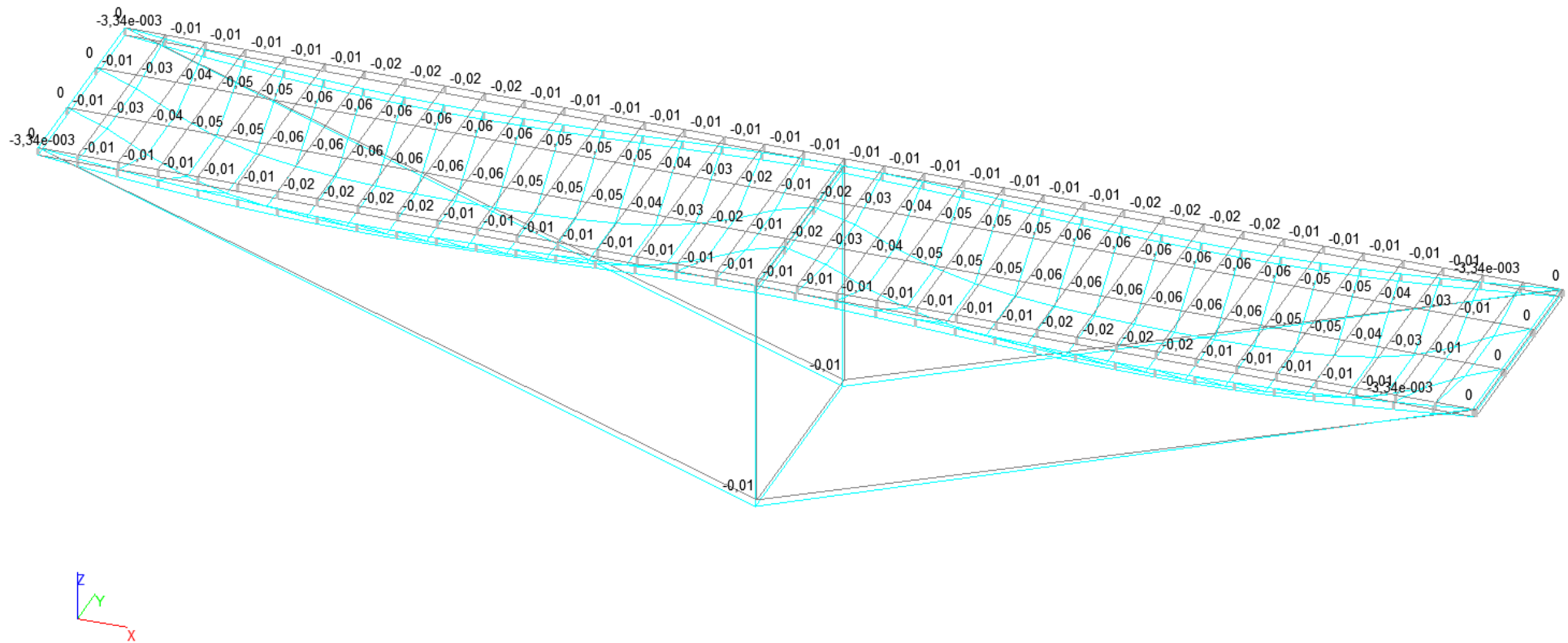


Рисунок 3.14 – Перемещения по оси z, (max 0,06 м = 60 мм) для 3-го варианта подкрепления

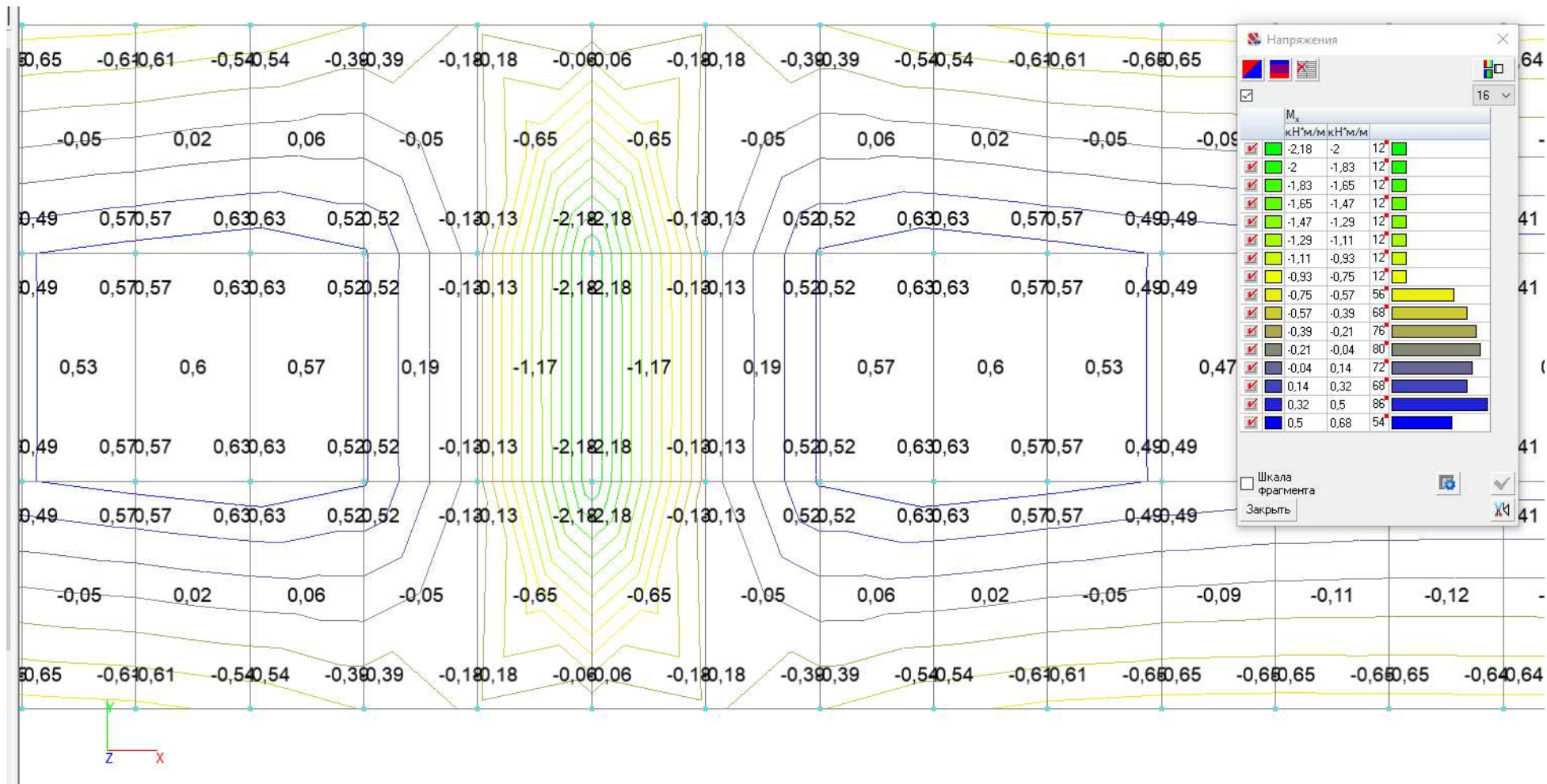


Рисунок 3.15 – Изополя M_x , (max 2,18 кНм/м) для 3-го варианта подкрепления

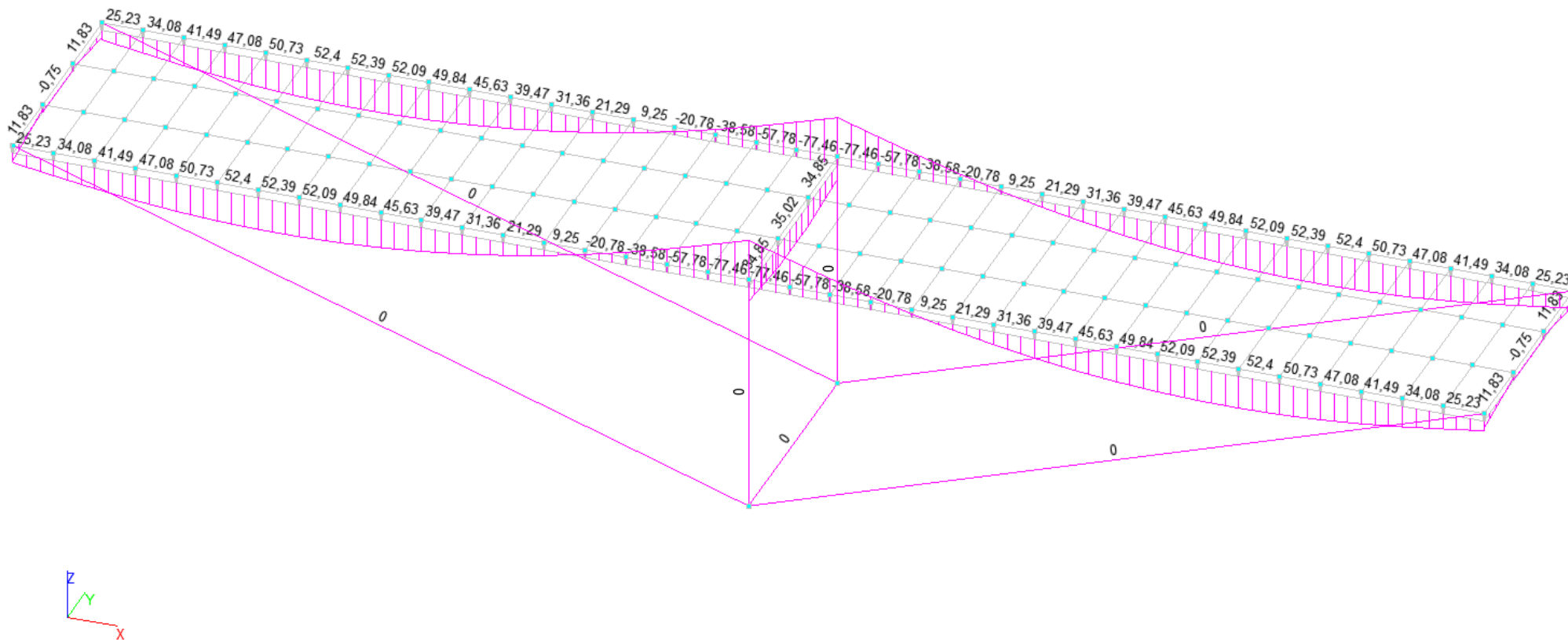


Рисунок 3.16 – Эпюра изгибающих моментов M_y , (max 770,46 кН*м) для 3-го варианта подкрепления

Вариант подкрепления 4

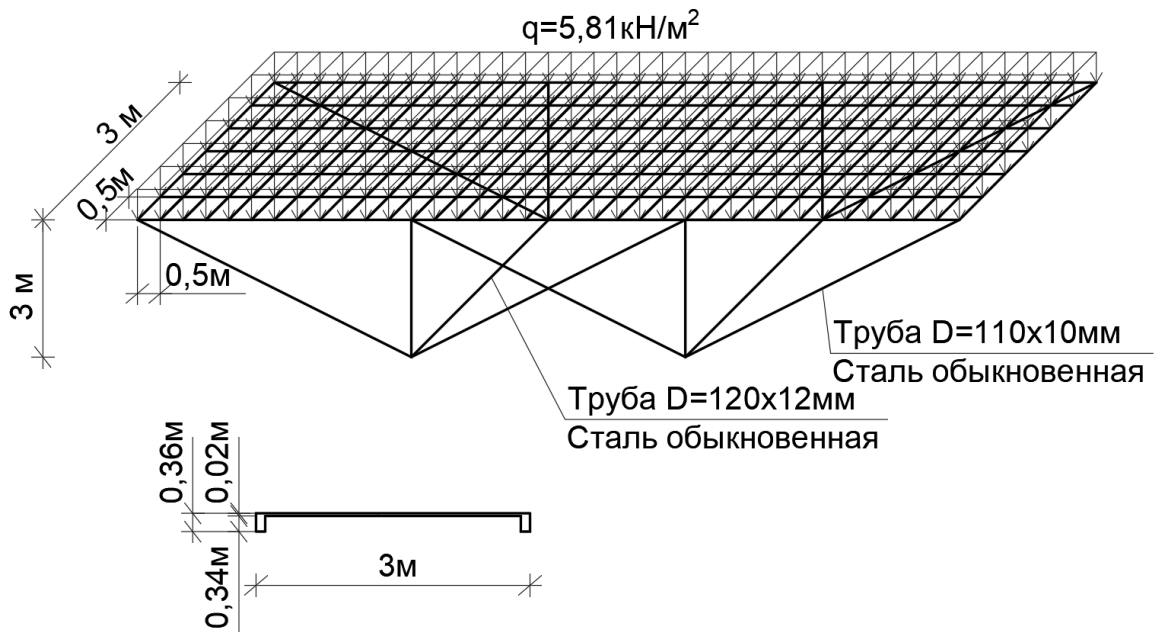


Рисунок 3.17 – Расчетная схема для 4-го варианта подкрепления

Расчет плиты на заданную нагрузку выполним по ПК SCAD. На (рис. 3.18) приведена, конечно-элементная, модель шпренгельной плиты в ПК SCAD для 4-го варианта подкрепления.

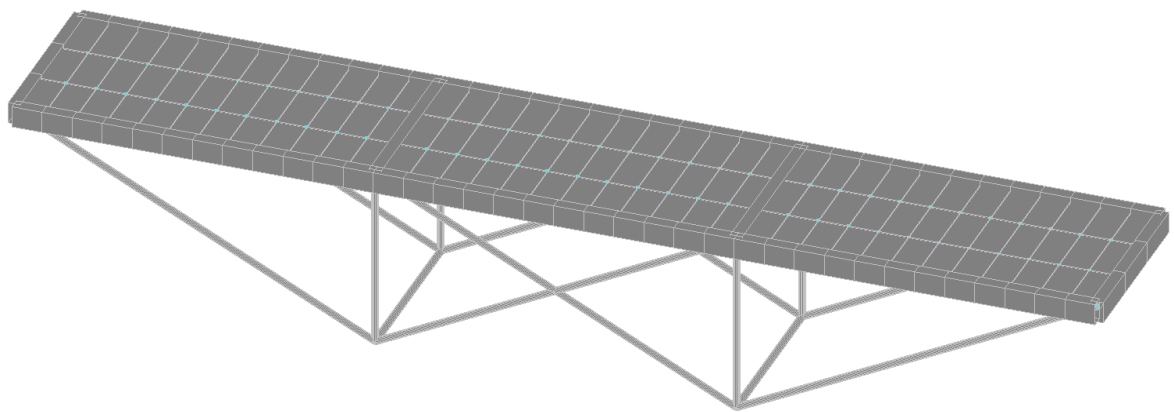


Рисунок 3.19 – Конечно-элементная модель расчетной схемы в ПК SCAD для 4-го варианта подкрепления

Результаты расчета плиты в виде изополей изгибающих моментов M_x , эпюры изгибающих моментов M_y и величин прогибов для 4-го варианта подкрепления приведены на (рис. 3.20-3.22).

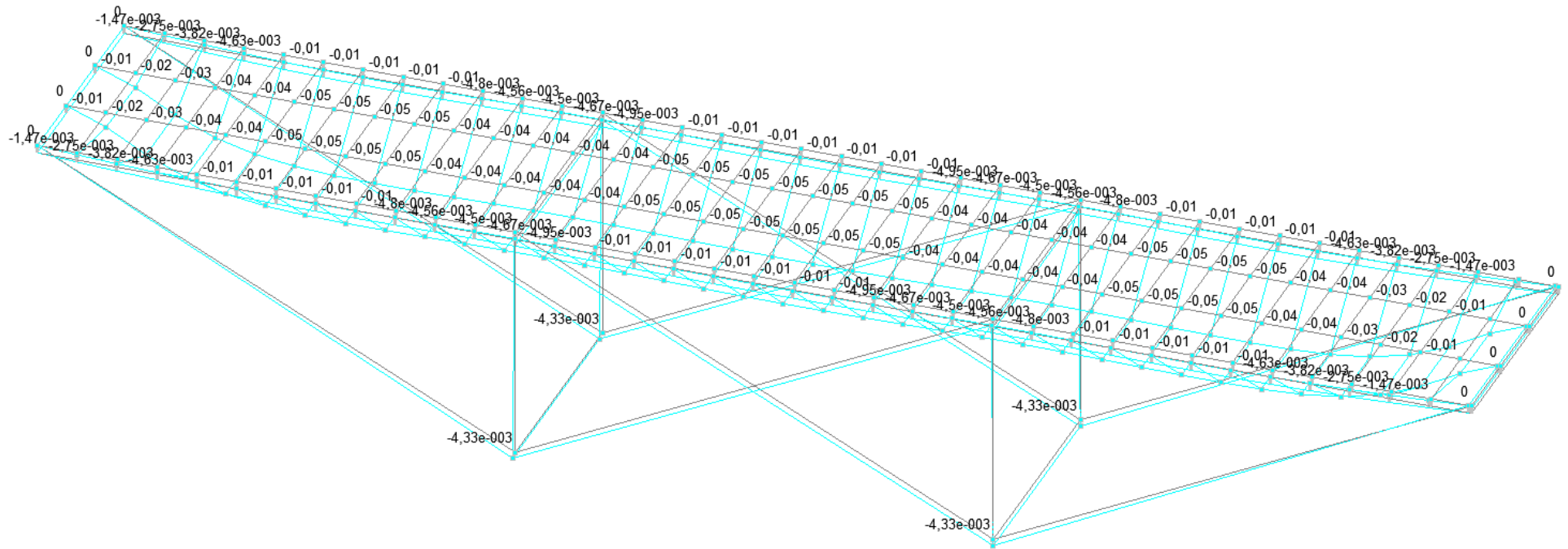


Рисунок 3.20 – Перемещения по оси z, (max 0,05 м = 50 мм) для 4-го варианта подкрепления

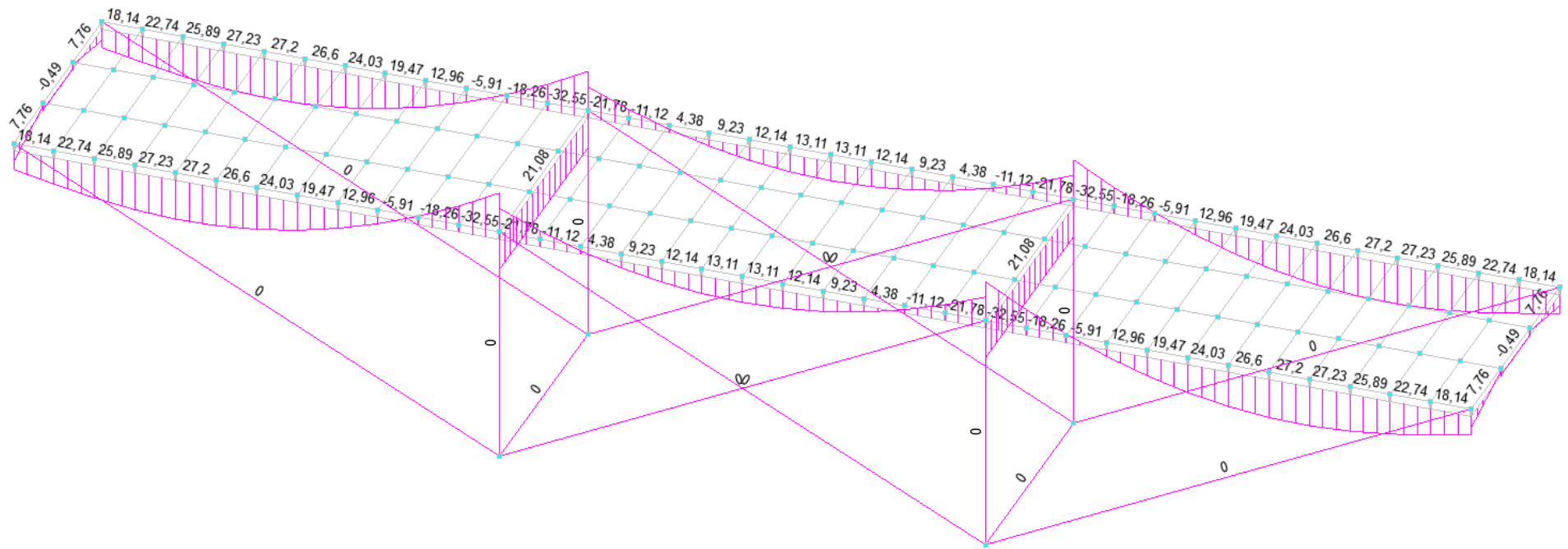


Рисунок 3.22 – Эпюра изгибающих моментов M_y , (max 340,55 кН*м) для 4-го варианта подкрепления

Результаты расчета плиты с различными вариантами шпренгеля таблица 3.1

Наименование	Перемещения по оси z, мм	Изополя M_x , кНм/м	Эпюра изгибающих моментов M_y , кН*м
Шпренгельная плита с вариантом подкрепления 1	40	2,31	330,67
Шпренгельная плита с вариантом подкрепления 2	50	2,29	390,86
Шпренгельная плита с вариантом подкрепления 3	60	2,18	770,46
Шпренгельная плита с вариантом подкрепления 4	50	2,09	340,55

Вывод: на основе полученных результатов можно сделать вывод, что самым выгодным подкреплением является шпренгельная плита с 1-ым вариантом подкрепления.

3.2 Расчет преднапряженной шпренгельной плиты на статические и динамические нагрузки

Исходные данные:

Проектирование цеха с покрытием из комбинированных блок-ферм.

Основные размеры здания:

- пролет $l = 18$ м;
- шаг конструкций $B = 3$ м;
- высота до низа несущих конструкций покрытия $h = 5,75$ м;
- длина здания $L = 33$ м.

Район строительства - г. Красноярск, характеризуется следующими природно-климатическими условиями:

- строительно-климатический подрайон 1В (СП 131.13330.2012);
- нормативное значение снегового покрова - 1,5 кПа (150 кгс/м²) - III снеговой район (СП 20.13330.2016);
- нормативное значение ветрового давления - 0,38 кПа (38 кгс/м²) - III ветровой район (СП 20.13330.2016);
- температура наружного воздуха наиболее холодной пятидневки (обеспеченностью 0,92) – минус 37°С (СП 131.13330.2012);
- средняя температура наружного воздуха за отопительный период - минус 6,7°С (СП 131.13330.2012);
- средняя продолжительность отопительного периода 233 суток (СП 131.13330.2012).

Общий вид здания представлен на (рис. 3.23).

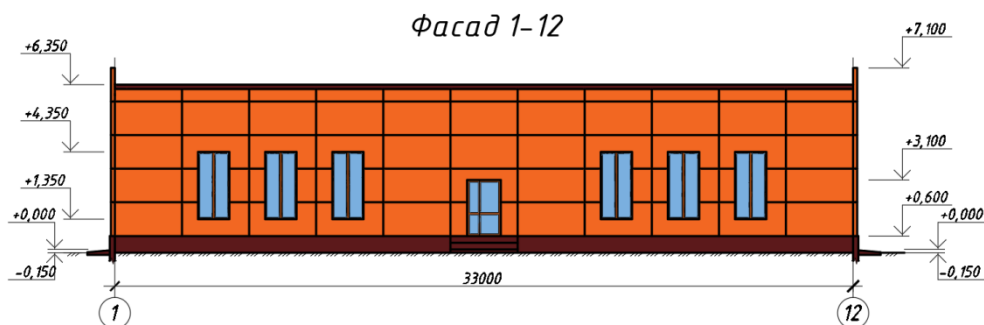


Рисунок 3.23 – Цех, общий вид

Описание конструктивной схемы

Каркас здания представляет собой блок-фему покрытия, которая опирается на колонны. Сопряжение колонн с фундаментами принято жестким, блок-ферм с колоннами – шарнирное.

Колонны приняты сечением 200 x 200 мм, из бетона В30, ребра жесткости выполнены из бетона В30 сечением 90 x 130 мм, элементы раскосов запроектированы в виде труб из стали обыкновенной сечением 110 x 10 мм, нижний пояс стальной сечением 120x12 мм.

Структурная плита размерами в плане $b \times l = 3 \times 18$ м и высотой $h = 0,03$ м. Размер ячейки (шаг) сетки $a = 1$ м.

Здание размерами в плане $b \times l = 18 \times 33$ м и высотой до низу несущих конструкций $h = 5,75$ м.

Описание расчетной схемы

Для расчета используется вычислительный комплекс конечно-элементного анализа конструкций SCAD.

Расчетная схема представляет собой идеализированную пространственную стрелевую модель, представленную на (рис. 3.24).

Конструкция является статически неопределимой системой, в которой усилия и перемещения элементов находятся в зависимости от их жесткостей. Для задания жесткостей необходимо назначить размеры поперечных сечений элементов расчетной схемы. На (рис. 3.25) представлены типы жесткостей расчетной схемы.

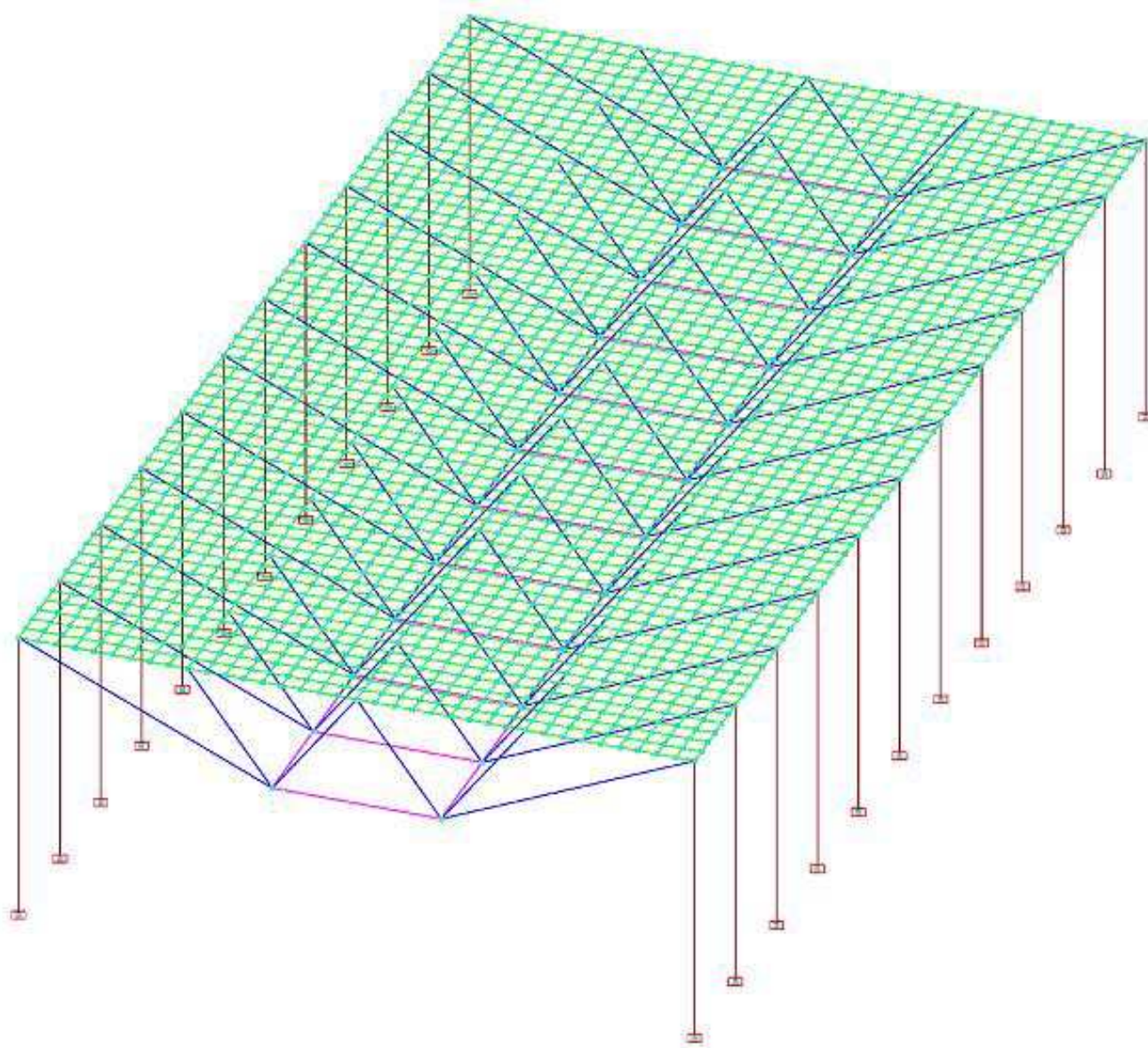


Рисунок 3.24 – Расчетная схема здания

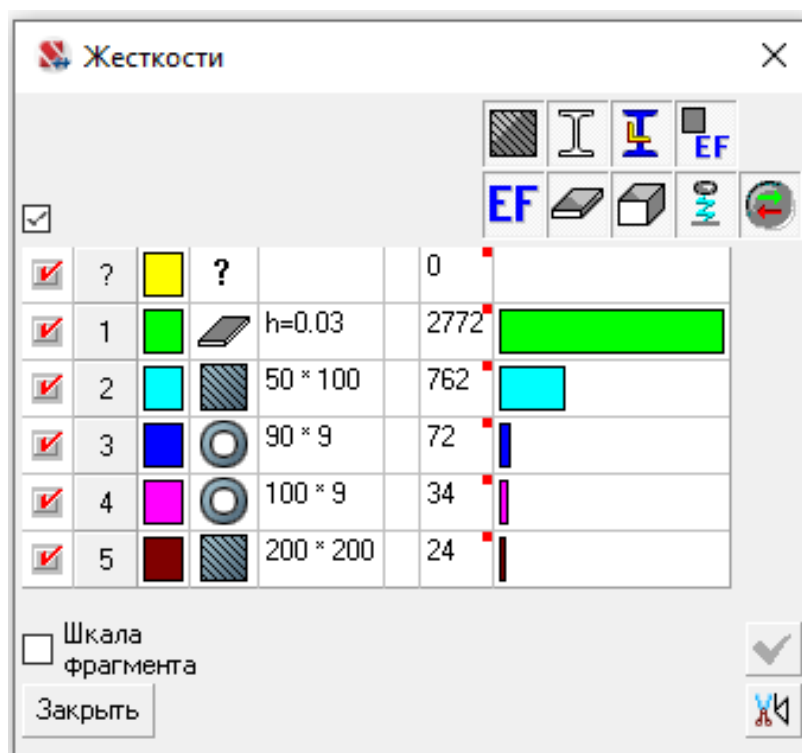


Рисунок 3.25 – Типы жесткости расчетной схемы

Сбор нагрузок

Сбор нагрузок представлен в таблице 1.

Таблица 3.2 – Сбор нагрузок

№ п/п	Наименование нагрузки	Нормативное значение $g_n, \text{кН/м}^2$	γ_f	Расчетное значение $g_p, \text{кН/м}^2$
Постоянные нагрузки				
1	Собственный вес конструкций	Автоматически в ПК SCAD	1,05	
2	Конструкция покрытия, в том числе	0,66		0,84
2.1	Гидроизоляция, 1,5 мм	0,015	1,2	0,018
2.2	Утеплитель ($\gamma=200\text{кг/м}^3$, $h=140\text{мм}$)	0,29	1,2	0,35
2.3	Водоизоляционный ковер	0,17	1,3	0,22
2.4	Гравий ($\gamma=1800\text{кг/м}^3$, $h=10\text{мм}$)	0,19	1,3	0,25
Временные нагрузки				
4	Снеговая нагрузка (III снеговой район по СП20.133330.2016). Равномерная нагрузка ($\mu = 1$)	1,5	1,4	2,1
5	Ветровая нагрузка (III ветровой район по СП20.133330.2016)	0,038	1,4	0,0532

На (рис. 3.26) показана таблица с комбинациями загружений.

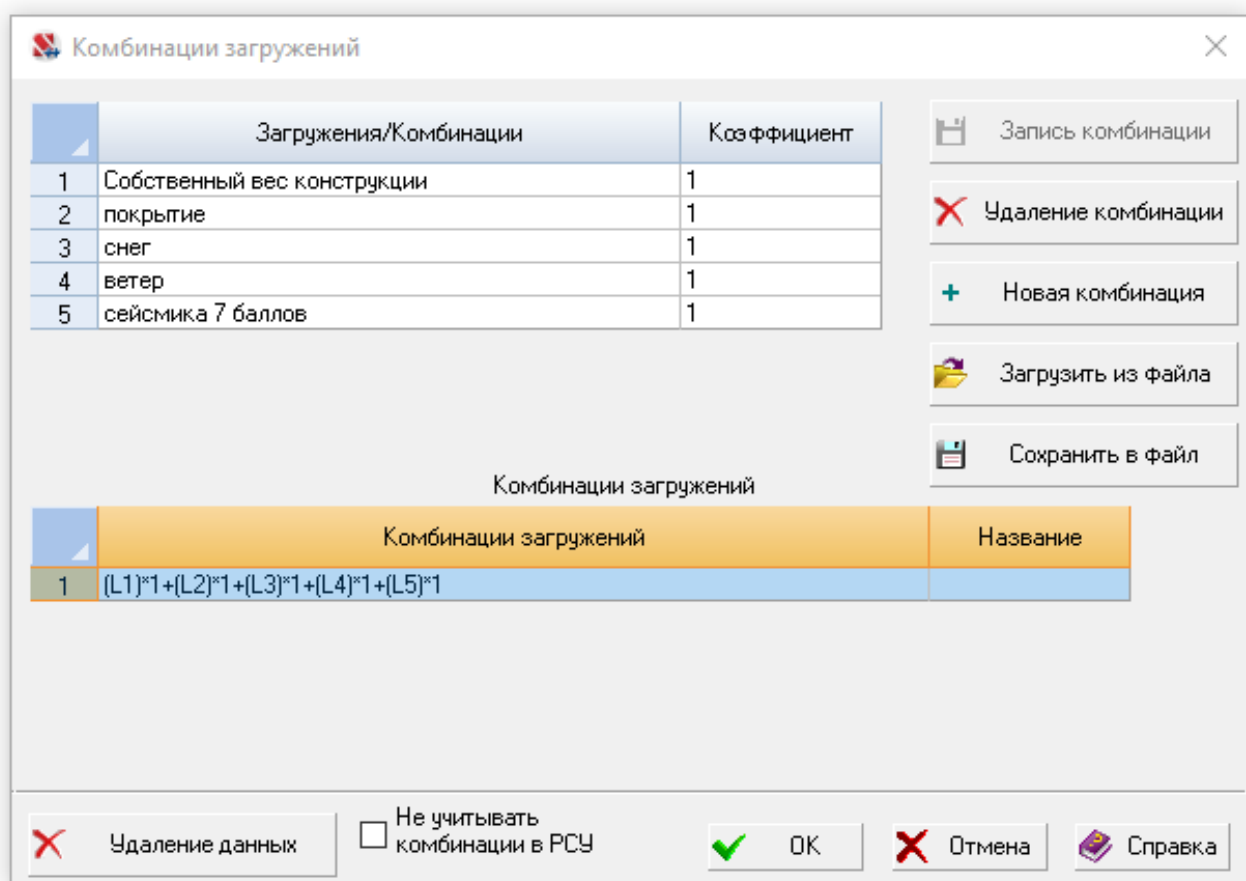


Рисунок 3.26 – Комбинации загружений

Анализ исходной задачи

Для анализа НДС исходной схемы блок-фермы покрытия, выполним расчет.

Изополя прогибов в шпренгельной плите от наихудшего сочетания нагрузок представлены на (рис.3.27).

Так как здание представляет собой одинаковые рамы с шагом 3 м, для удобства анализа будем использовать раму с самым невыгодным положением.

Перемещения исходной схемы Δz от наихудшего сочетания нагрузок представлены на рисунке 3.27.

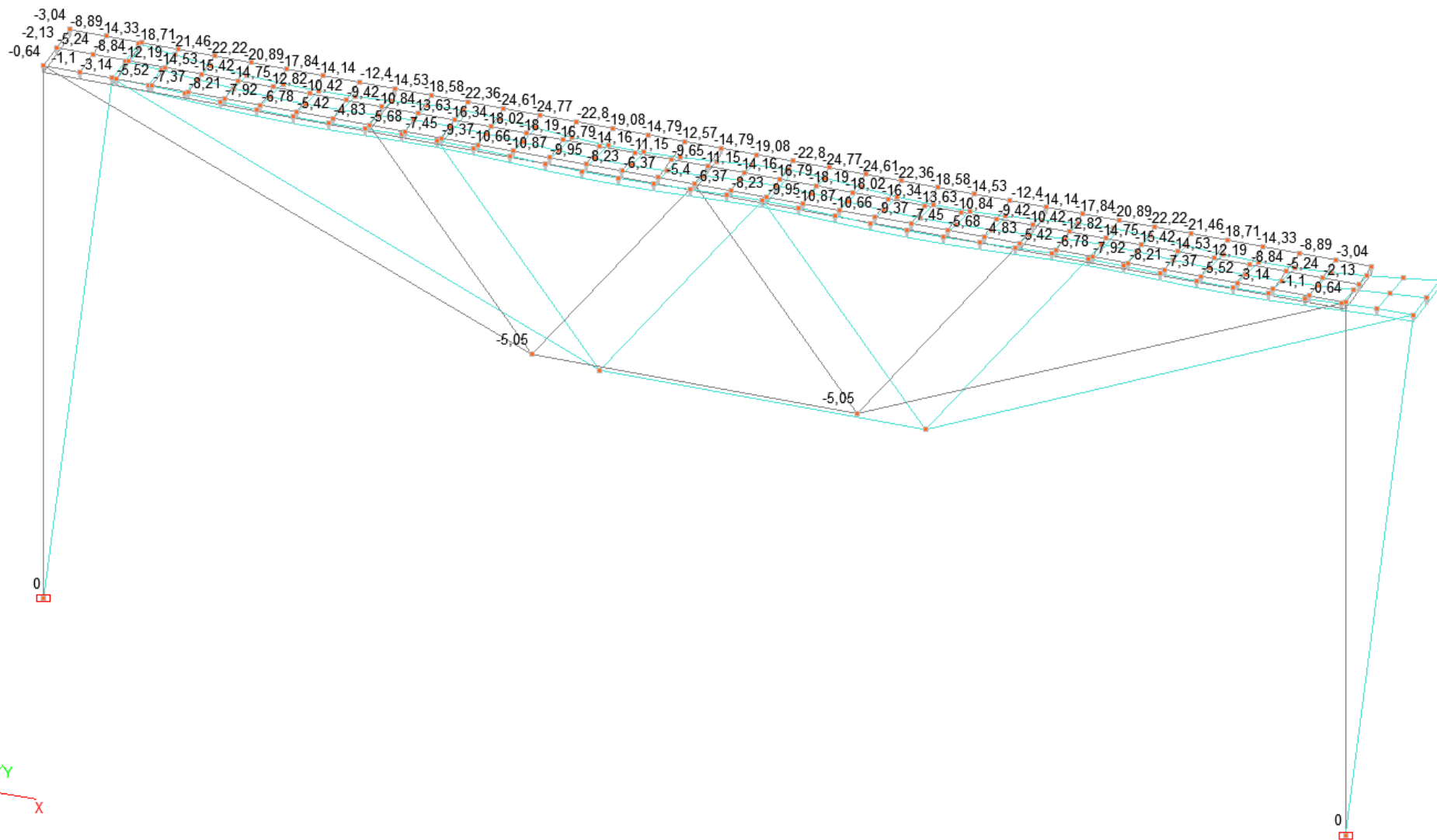


Рисунок 3.27 – Перемещения исходной схемы z, мм

Как видно из рисунка 3.27, максимальное перемещение $z = -27,55$ мм. Предельный прогиб для 18м, $f_u = 1/240 = 75$ мм.

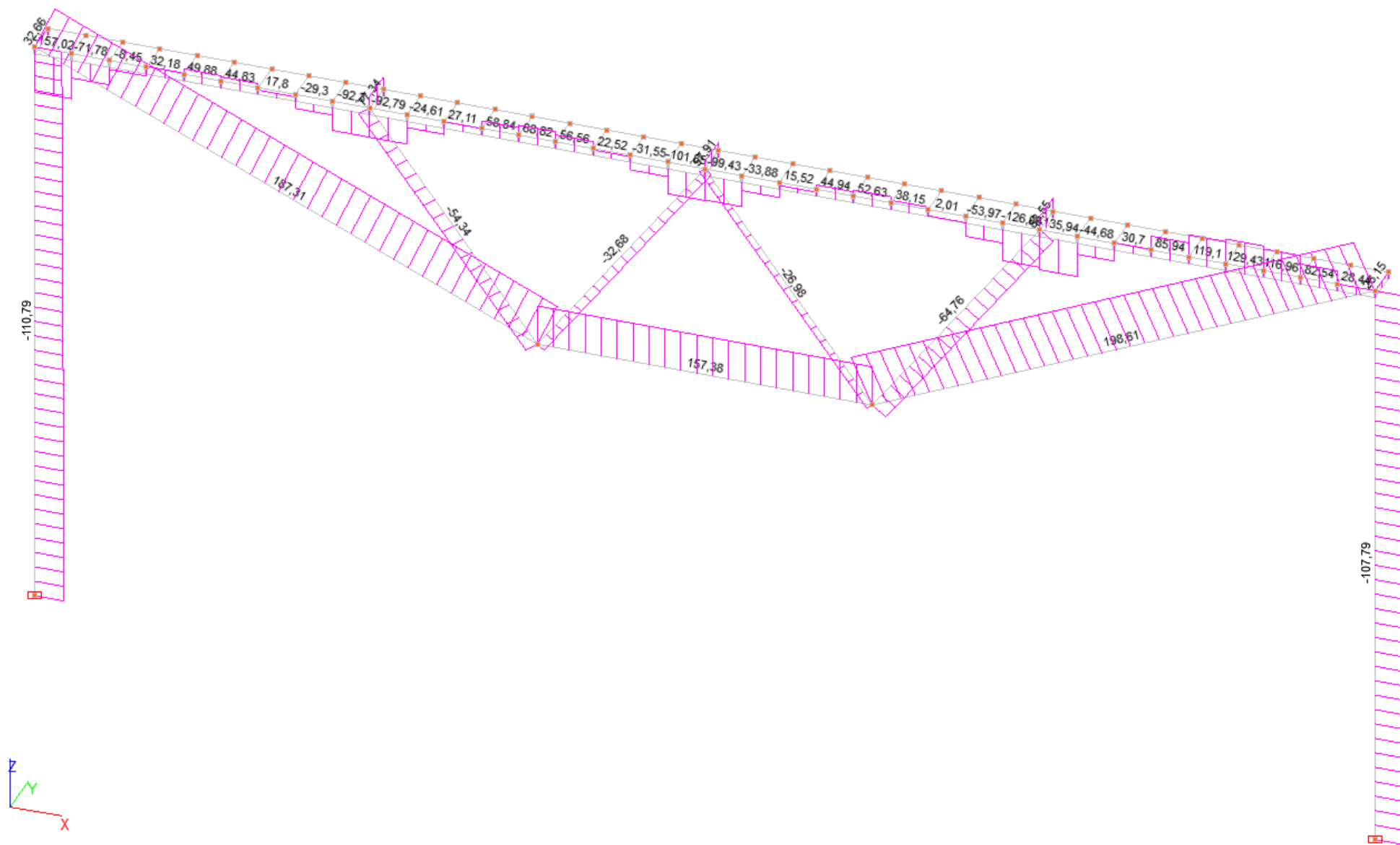


Рисунок 3.28 – Продольные усилия исходной схемы $N = 236,02$ кН

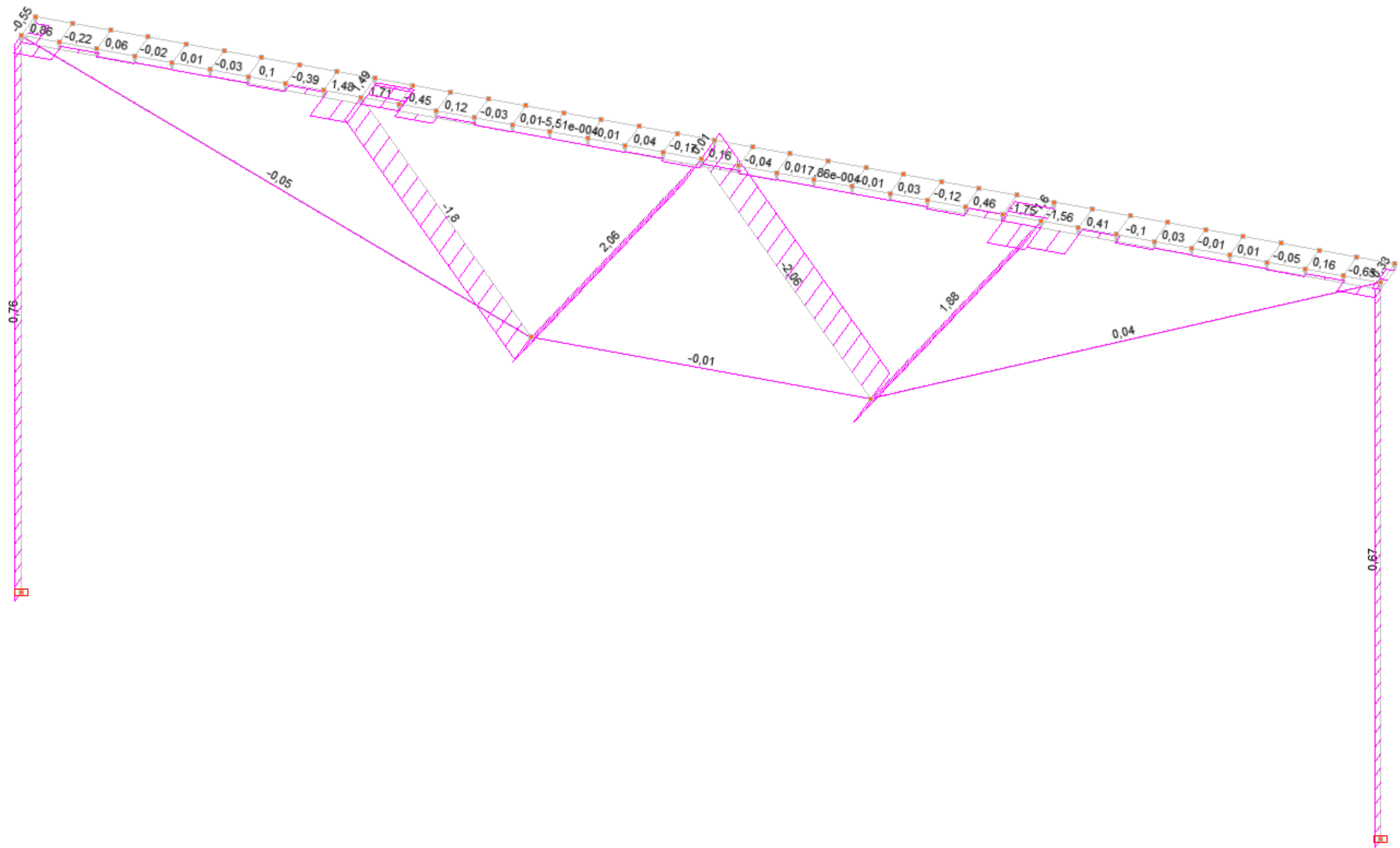


Рисунок 3.29 – Эпюра поперечных сил (max Q = -2,07 Н)

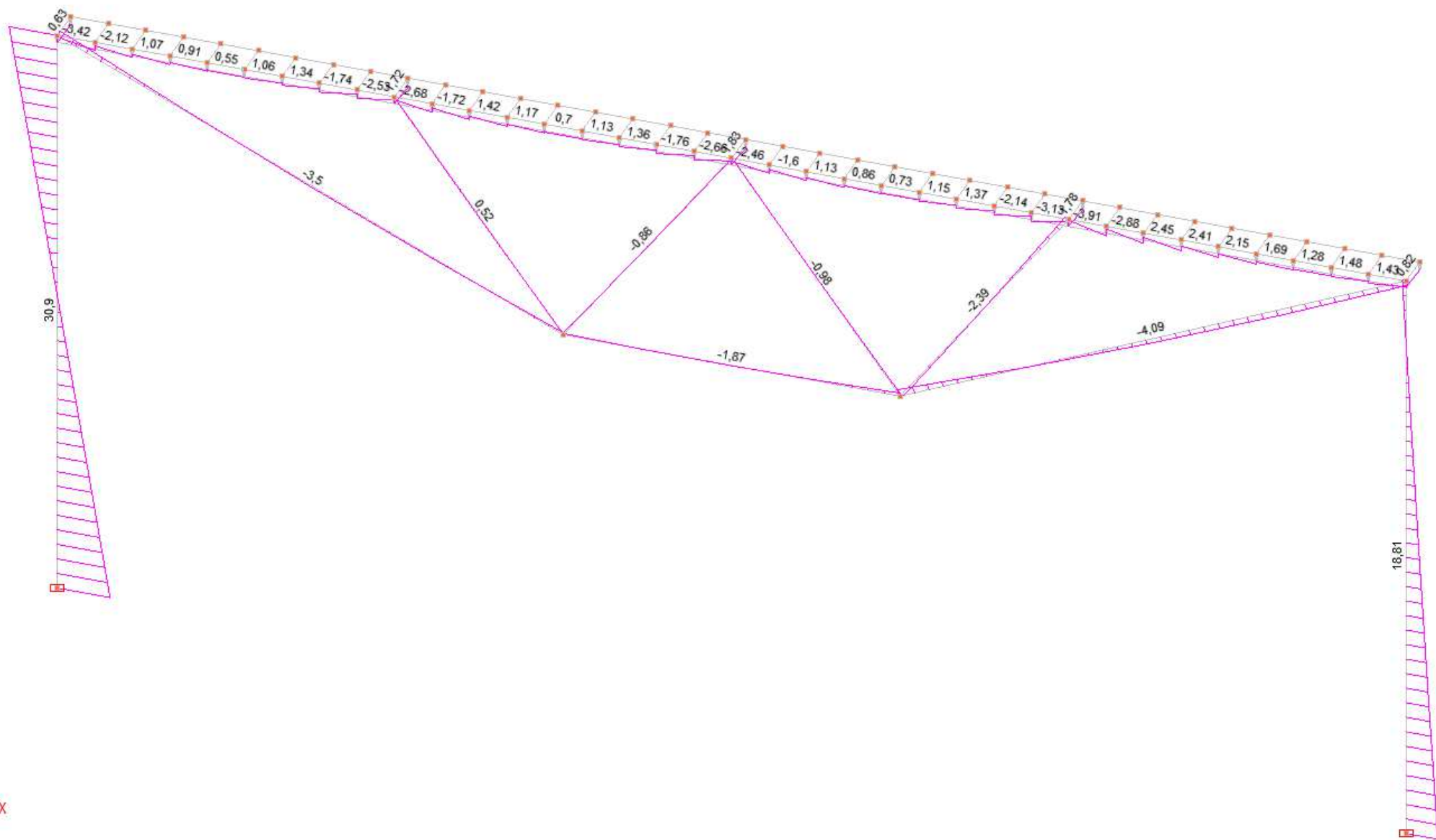


Рисунок 3.30 – Эпюры изгибающих моментов M_y (максимальный момент - 39,66 кН*м.)

Регулирование комбинированной блок-фермы покрытия

Анализ НДС исходной системы показывает, что возможно решение задачи регулирования в виде уменьшения максимального прогиба системы.

Постановка задачи регулирования.

Критерий регулирования примем в виде

$$W_{OK} = 9,3 \text{ мм.} \quad (1)$$

В качестве параметра регулирования примем X_1^{Π} - полное усилие в затяжке шпренгеля, при котором выполняется условие (1).

Путем предварительного напряжения двух симметричных элементов нижнего пояса шпренгеля, уменьшим величину максимального прогиба в соответствии с критерием 1.

В качестве параметра регулирования примем усилие X_1^{Π} (рис. 3.31).

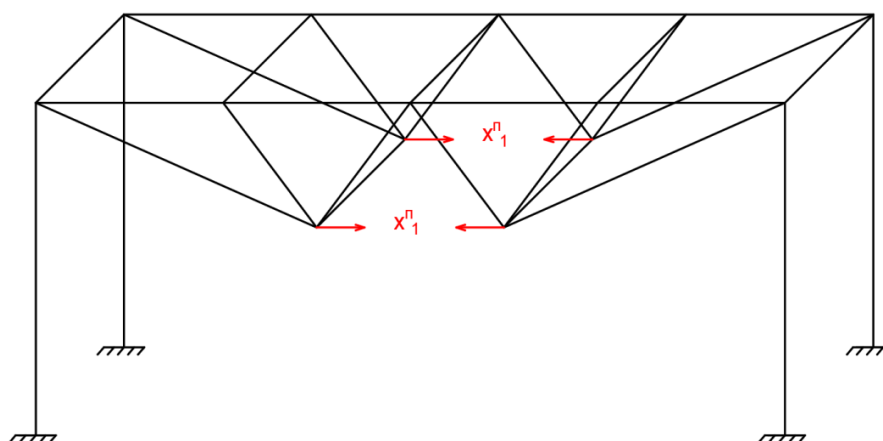


Рисунок 3.31 – Вариант регулирования

1 Постановка задачи регулирования

Путем предварительного напряжения двух симметричных элементов нижнего пояса шпренгеля X_1^{Π} , уменьшим величину максимального прогиба до 6,5 мм.

Решение задачи регулирования

Вначале выполним расчет на единичное воздействие параметра регулирования $X_1^{\Pi} = 1 \text{ кН}$ измененной расчетной схемы (рис. 3.32-3.36).

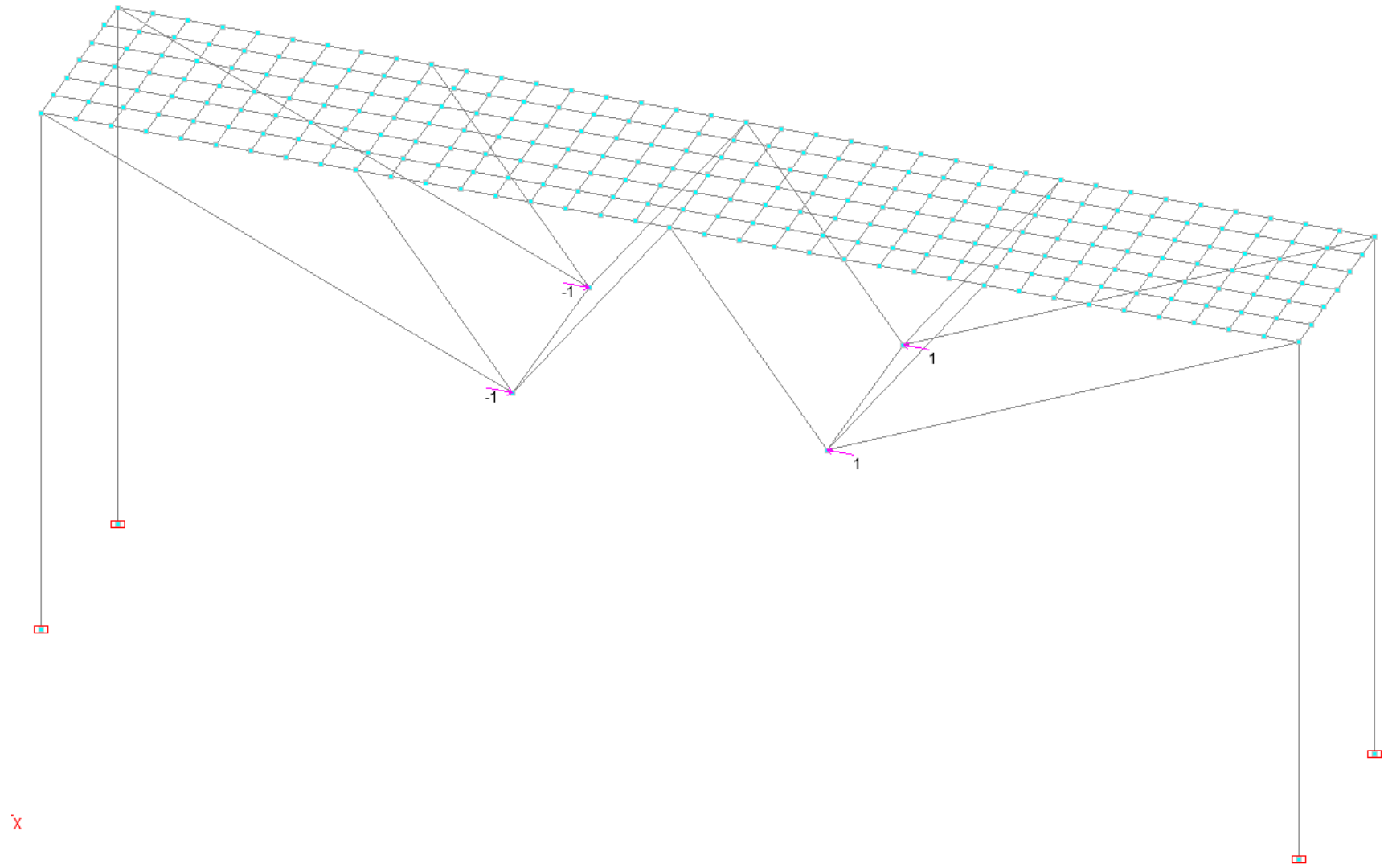


Рисунок 3.32 – Расчетная схема

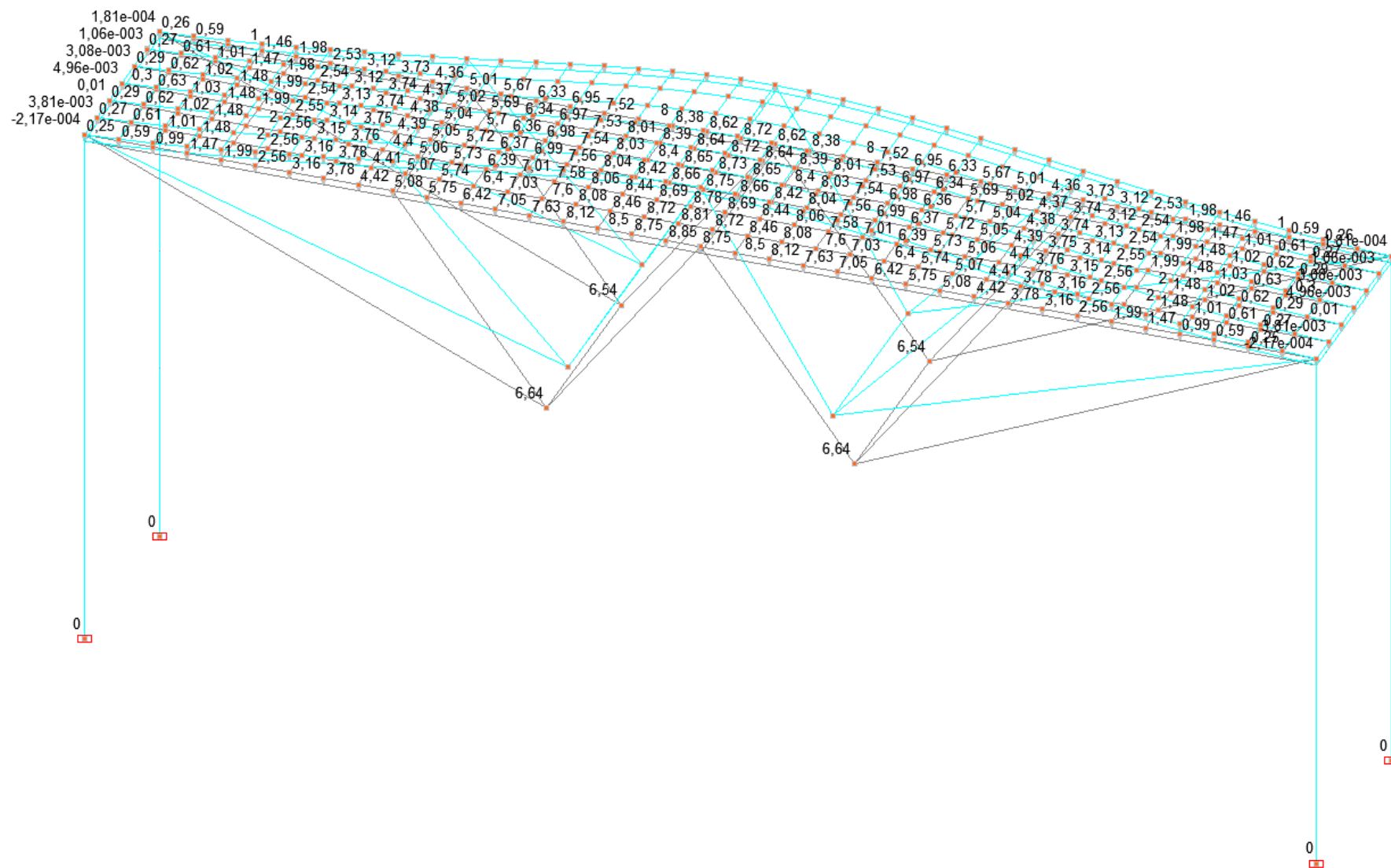
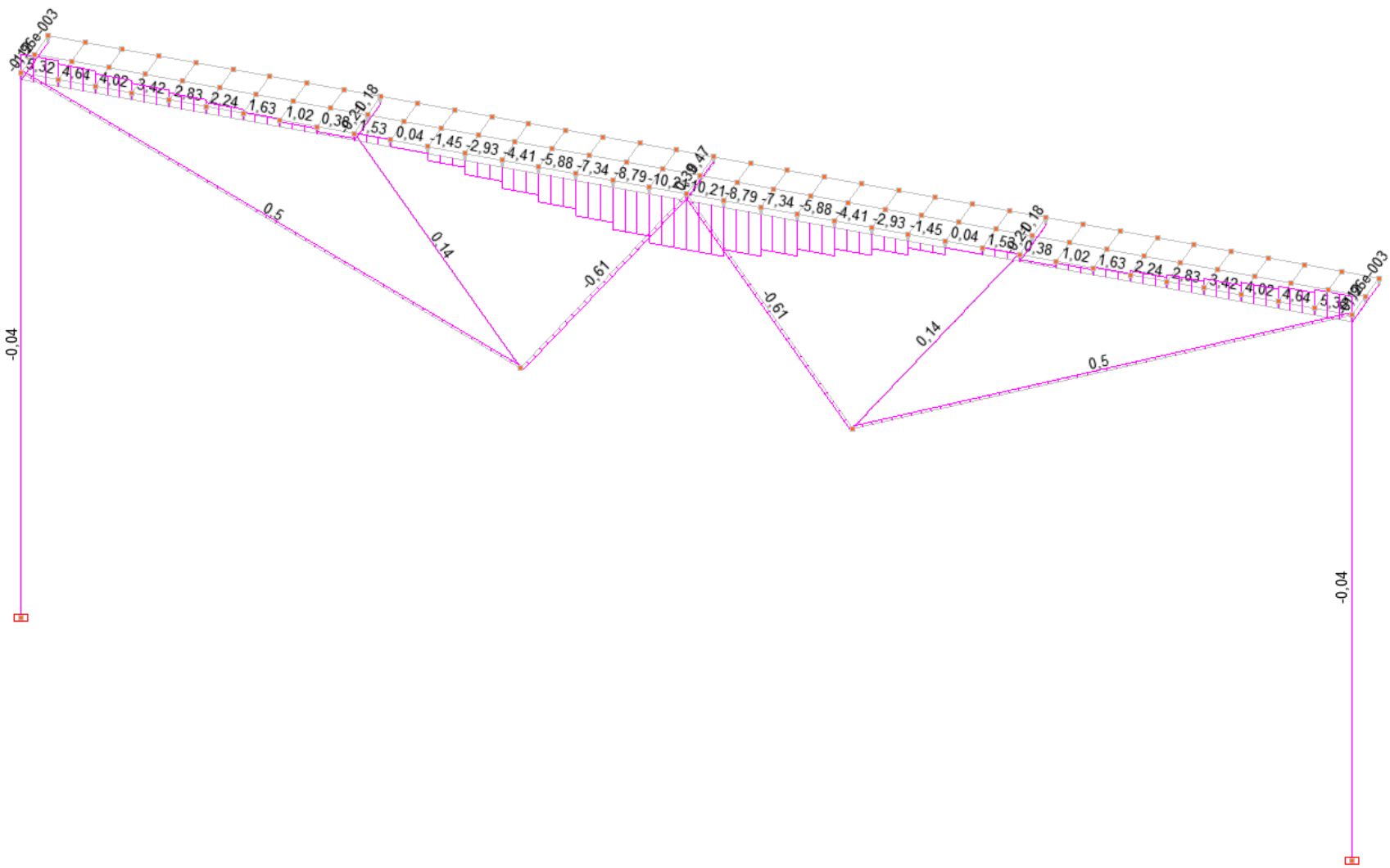


Рисунок 3.33 – Перемещения от $X_1 = 1 \text{ кН}$, $z = 8,85 \text{ мм}$



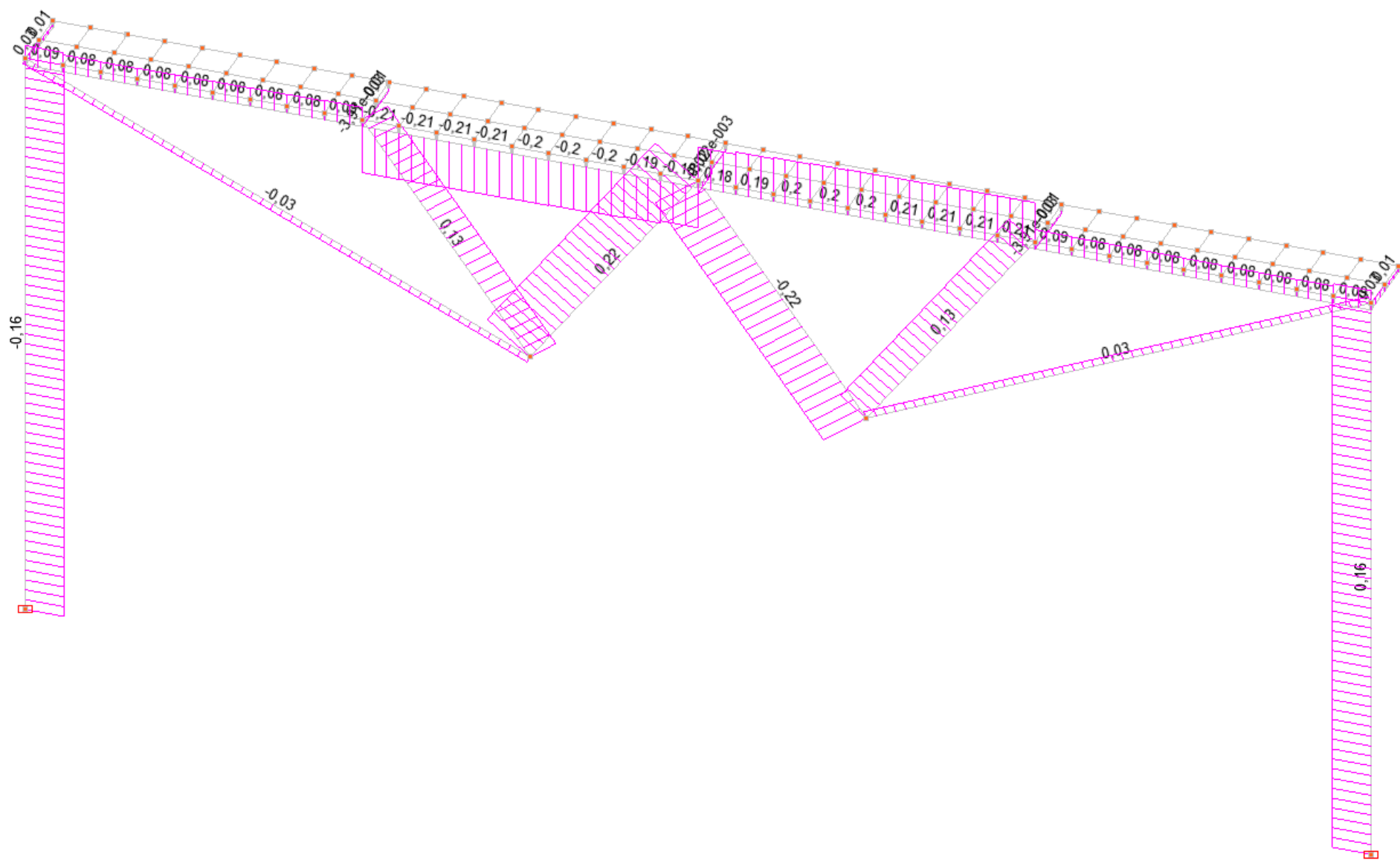


Рисунок 3.35 – Эпюра поперечных сил от $X_1 = 1 \text{ кН}$, ($\max - Q = 0,22 \text{ кН}$)

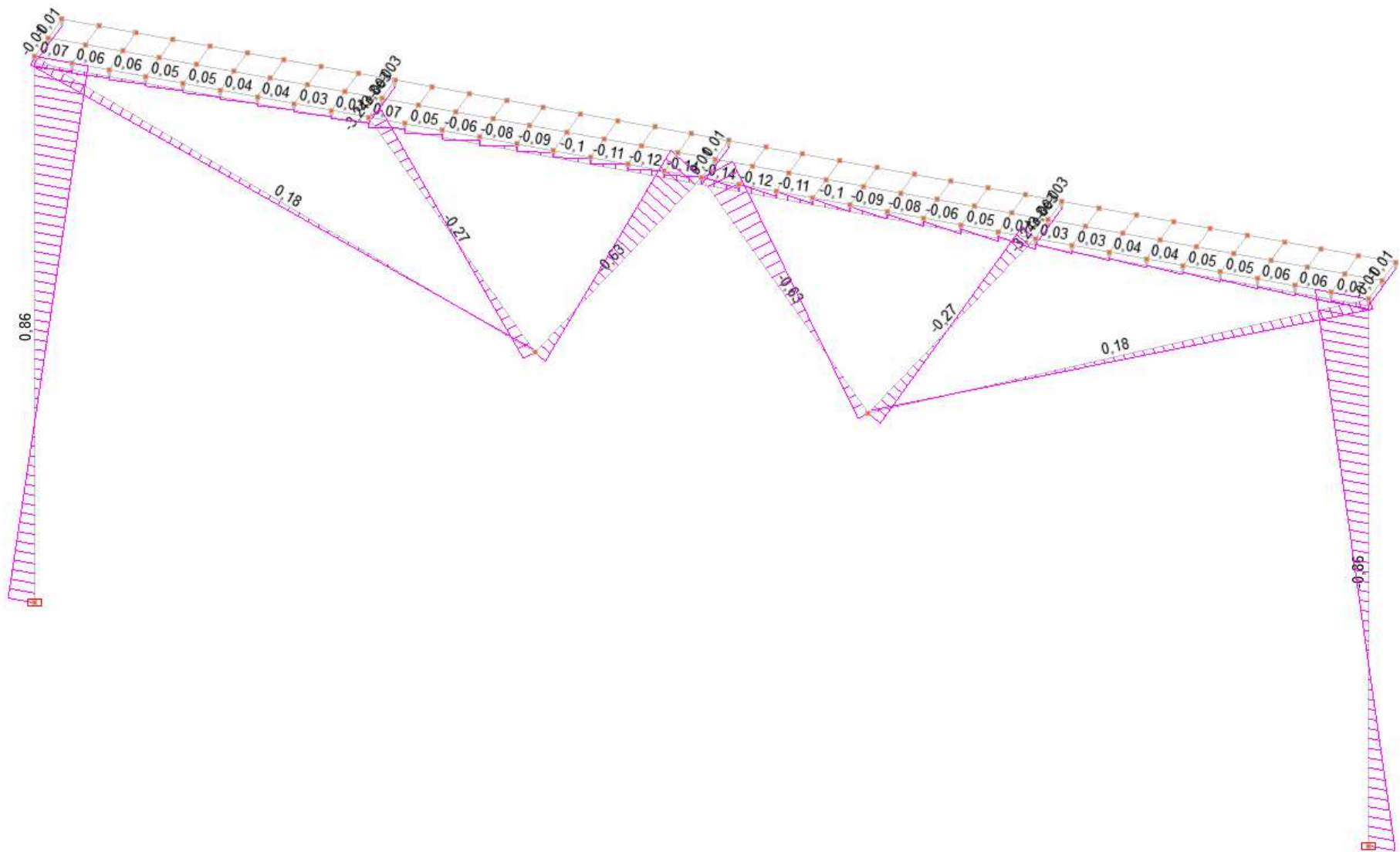


Рисунок 3.36 – Эпюра изгибающих моментов от $X_1 = 1 \text{ кН}$, ($\max - M_y = 0,91 \text{ кН*м}$).

Далее рассчитаем на заданную нагрузку в измененной расчетной схеме. Полученные результаты показаны на (рис.3.37- 3.40).

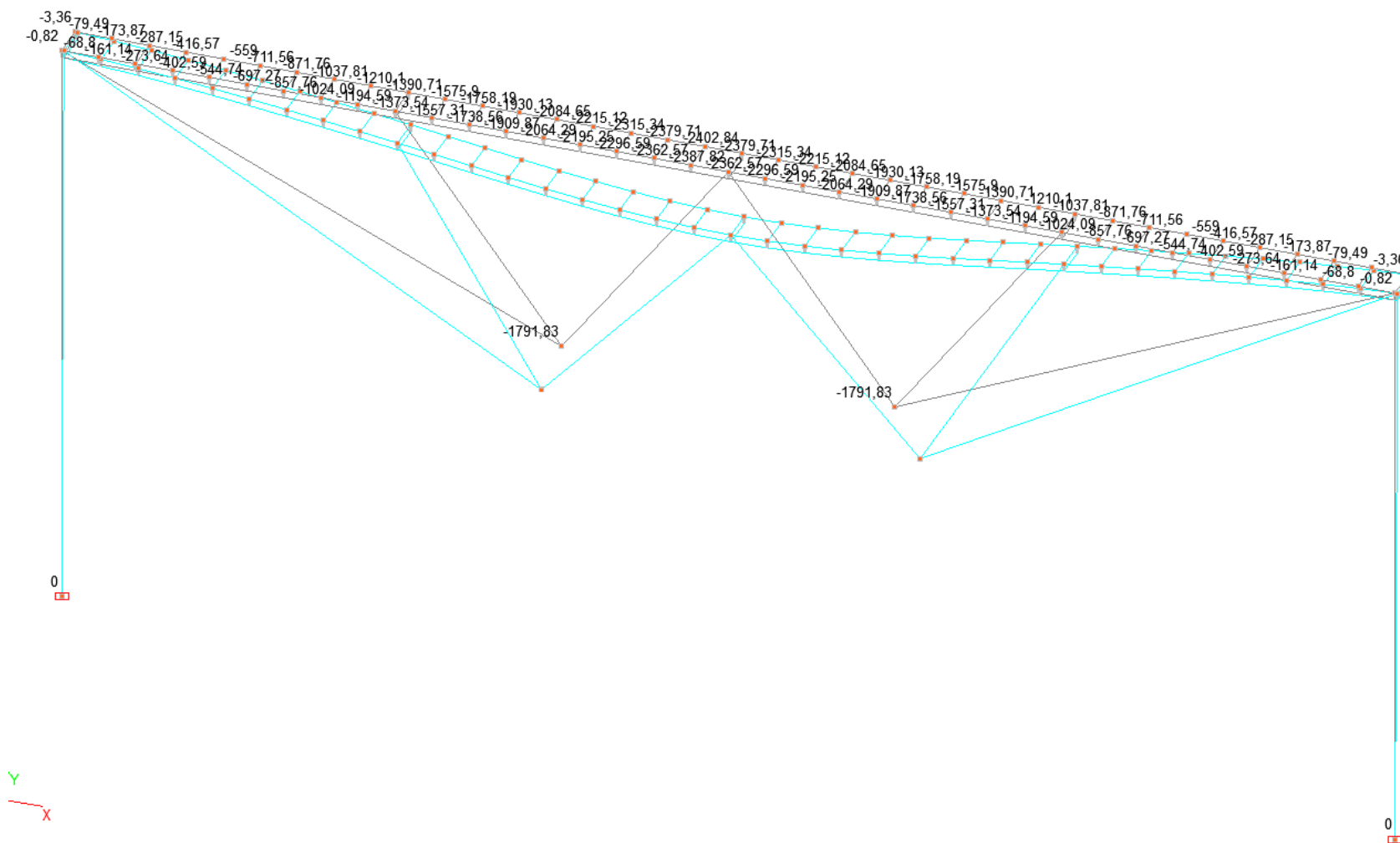


Рисунок 3.37 – Перемещения от заданной нагрузки, $z = -2733,44$ мм

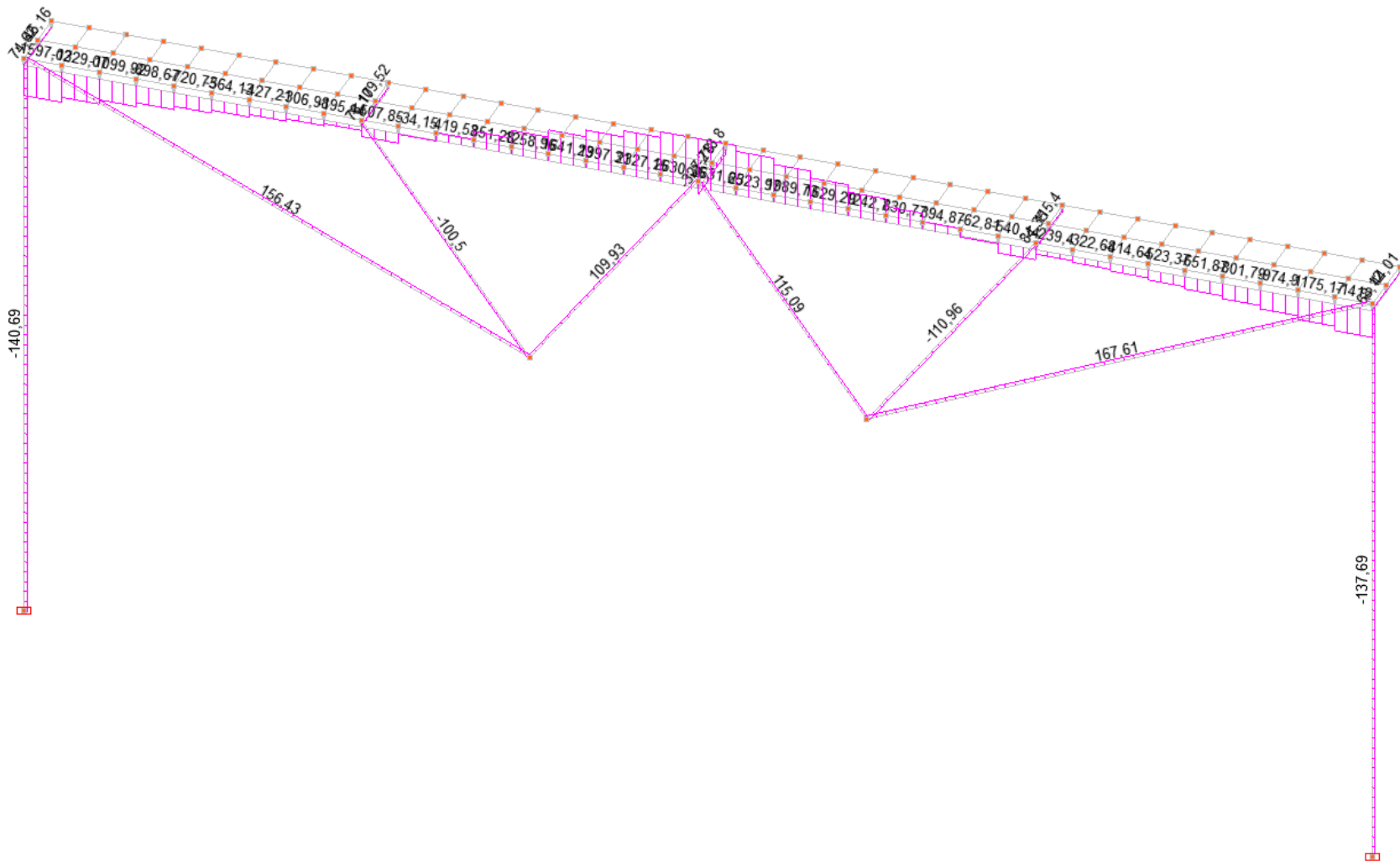


Рисунок 3.38 – Продольные усилия, (max - N = 3082,63 кН)

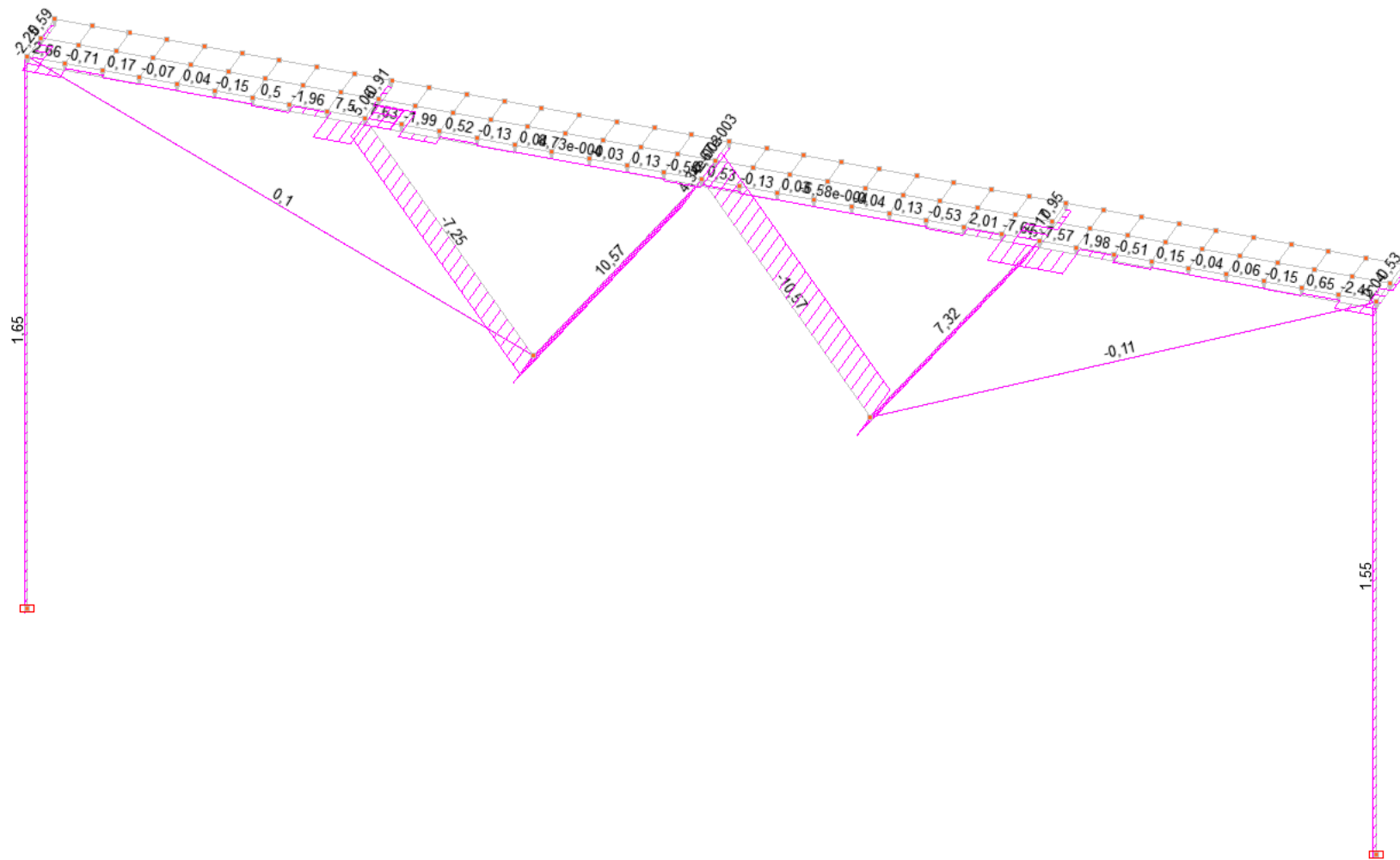


Рисунок 3.39 – Эпюра поперечных сил, (max - Q = 14,32 кН)

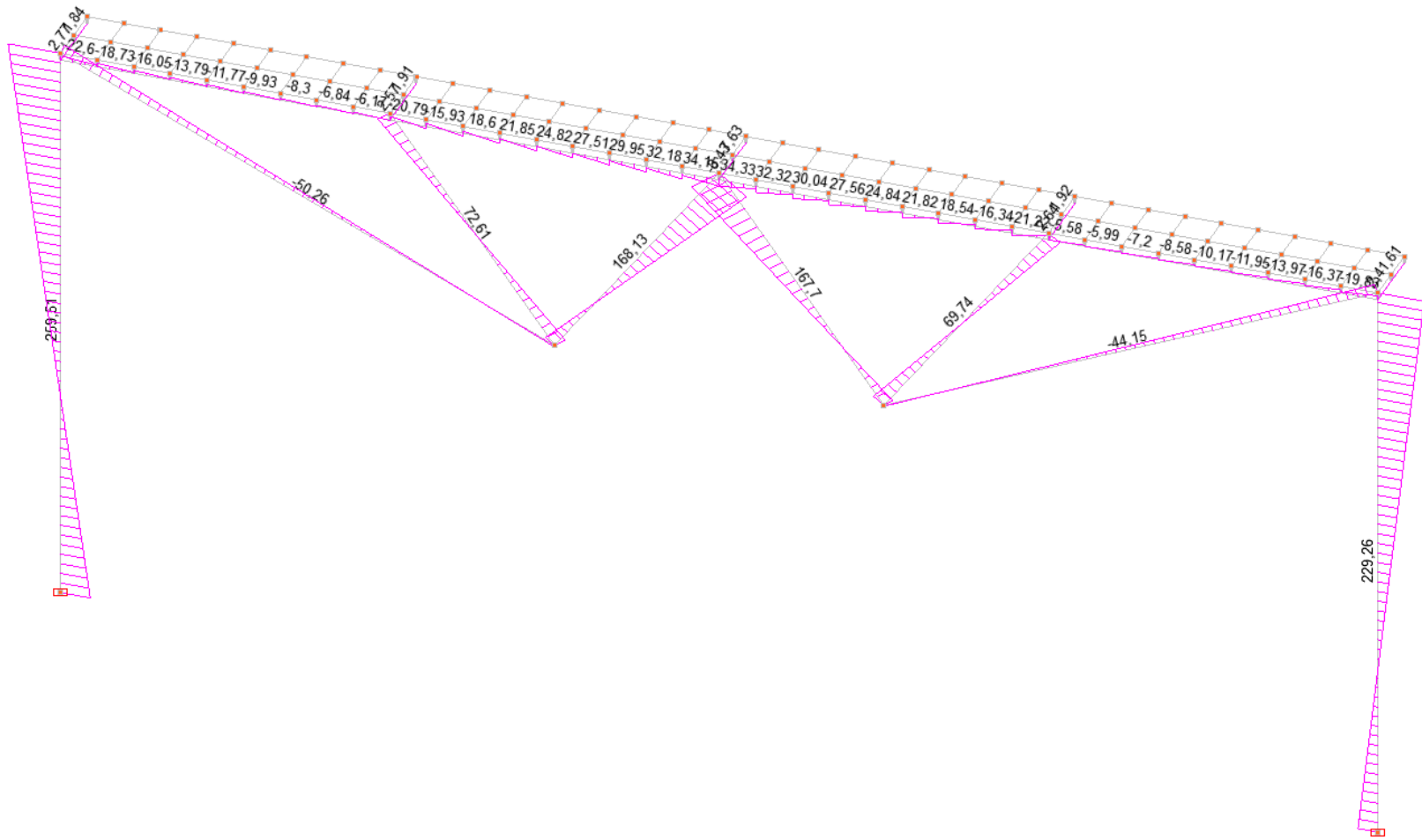


Рисунок 3.40 - Эпюра изгибающего момента, $M_y = 320,87 \text{ кН*м}$.

Далее используя принцип независимости действия сил, представим критерий регулирования в виде:

$$W_{OK} = W_P + W_1 \cdot X_1^{\Pi} = -9,3 \text{ мм.} \quad (2)$$

$W_1 = -8,85 \text{ мм}$; $W_P = -2733,44 \text{ мм}$ получены в измененной схеме

Подставив значения прогибов в уравнение (2) получим

$$(-2733,44) - 8,85 \cdot X_1^{\Pi} = -9,3 \text{ мм.}$$

Решив данное уравнение определим параметр регулирования.

$$X_1^{\Pi} = 307,28 \text{ кН}$$

Для получения окончательного решения выполним расчет с измененной расчетной схемой на одновременное действие заданной нагрузки и найденное значение параметра регулирования $X_1^{\Pi} = 307,28 \text{ кН}$ (рис. 3.41) полученные результаты (рис. 3.42-3.45).

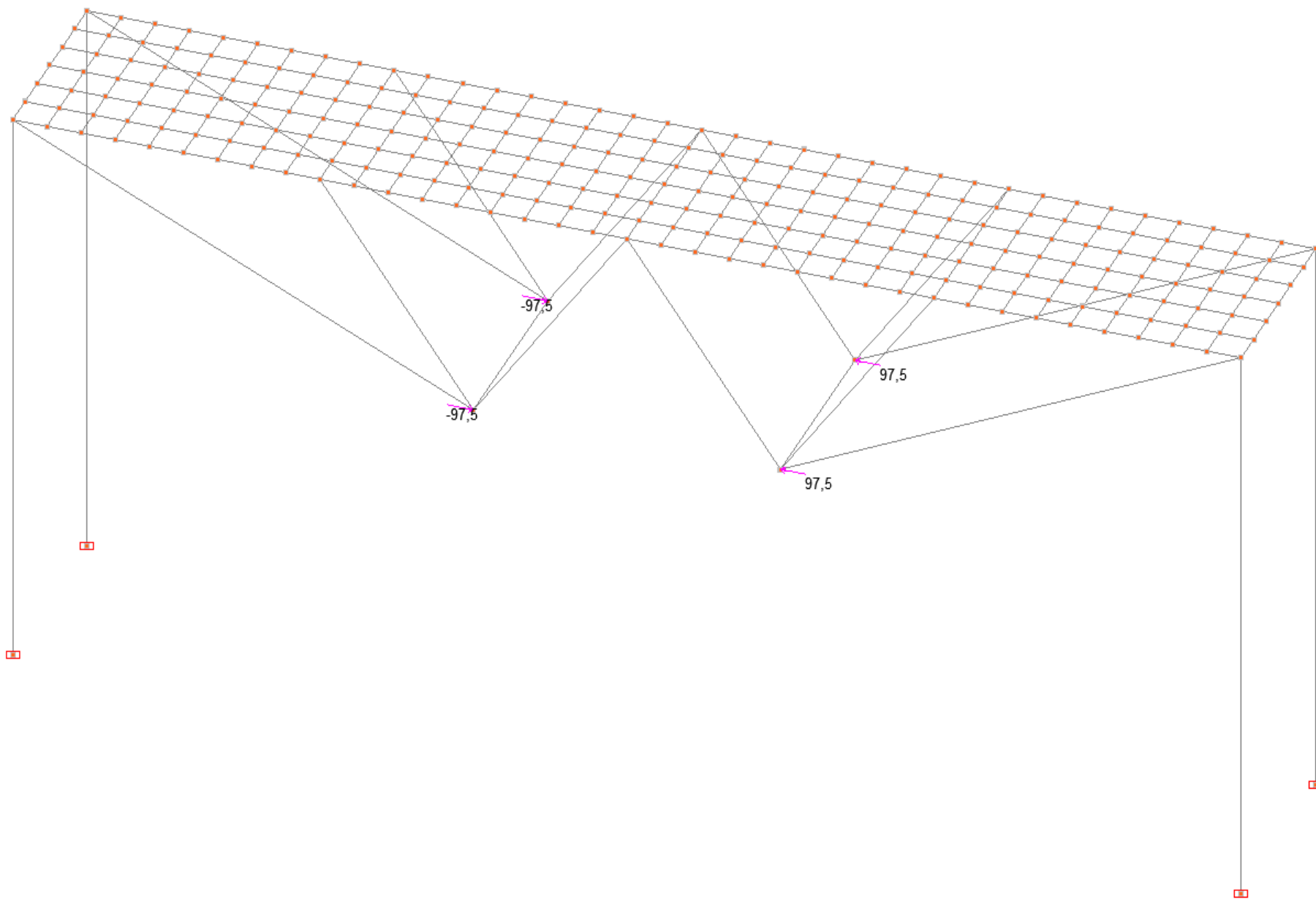


Рисунок 3.41 - Найденное значение параметра регулирования $X_1^{\Pi} = 307,28$ кН

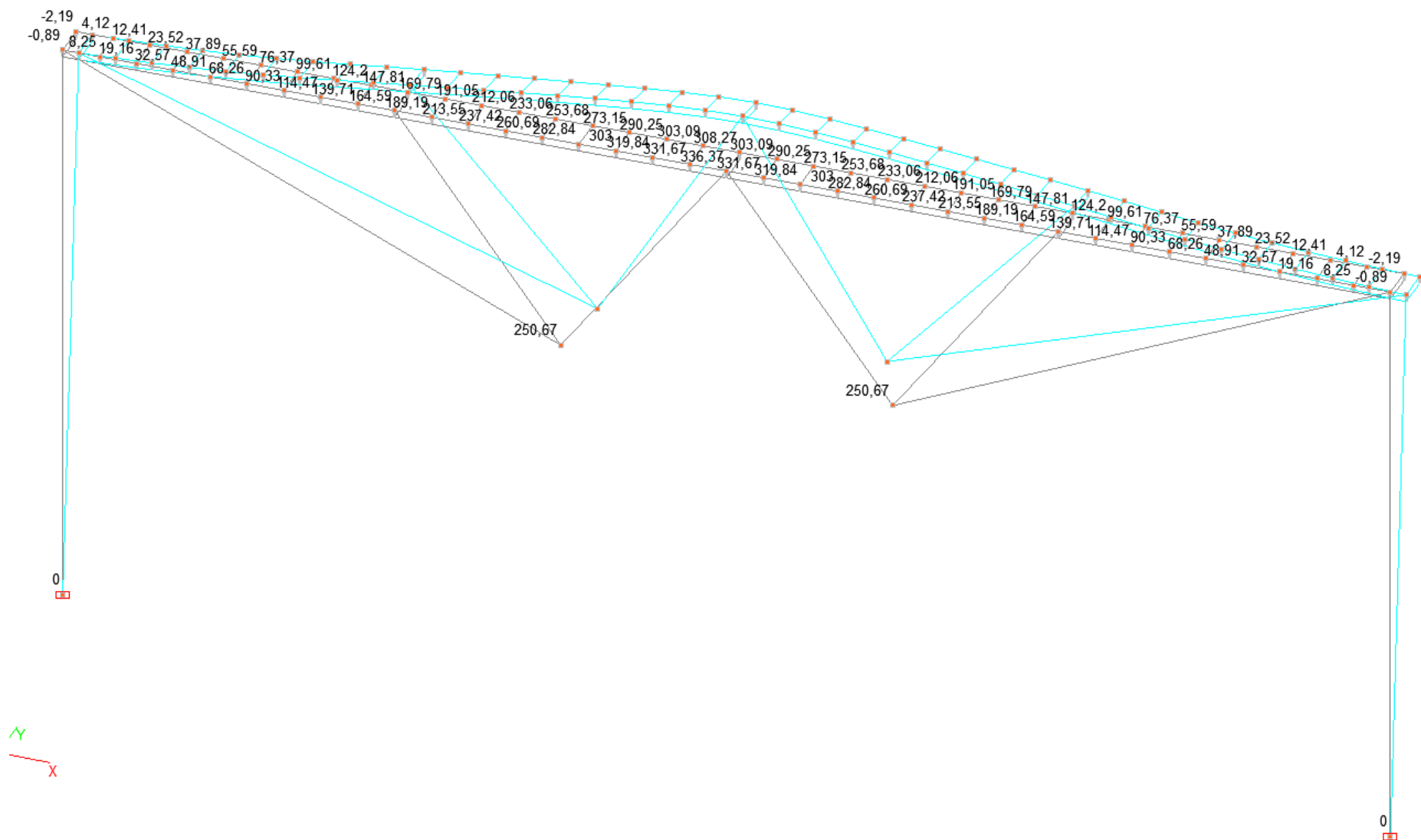


Рисунок 3.42 – Перемещения, $z_{ок} = -15,08$ мм

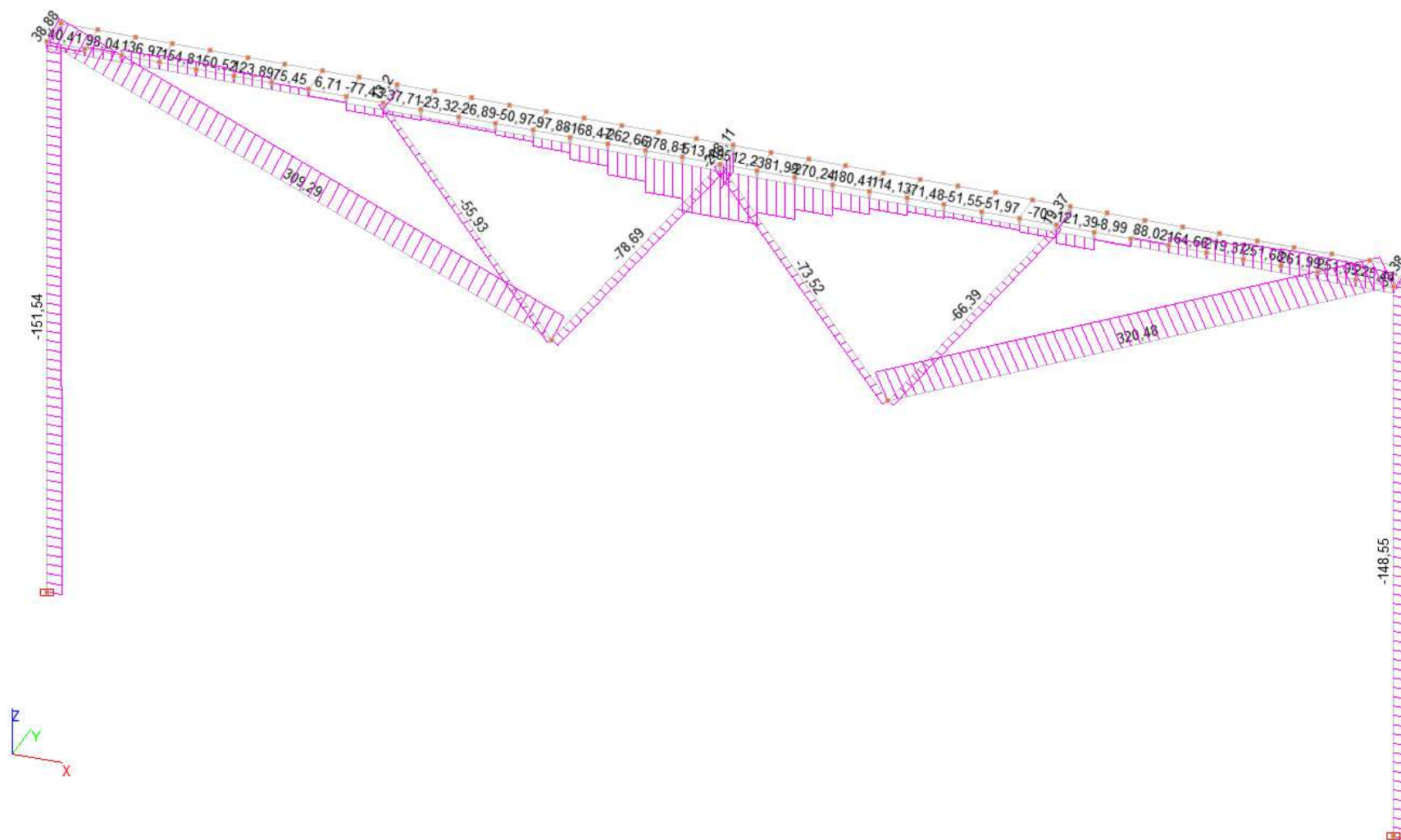


Рисунок 3.43 – Продольные усилия, (max - $N_{ок} = 523,54$ кН)

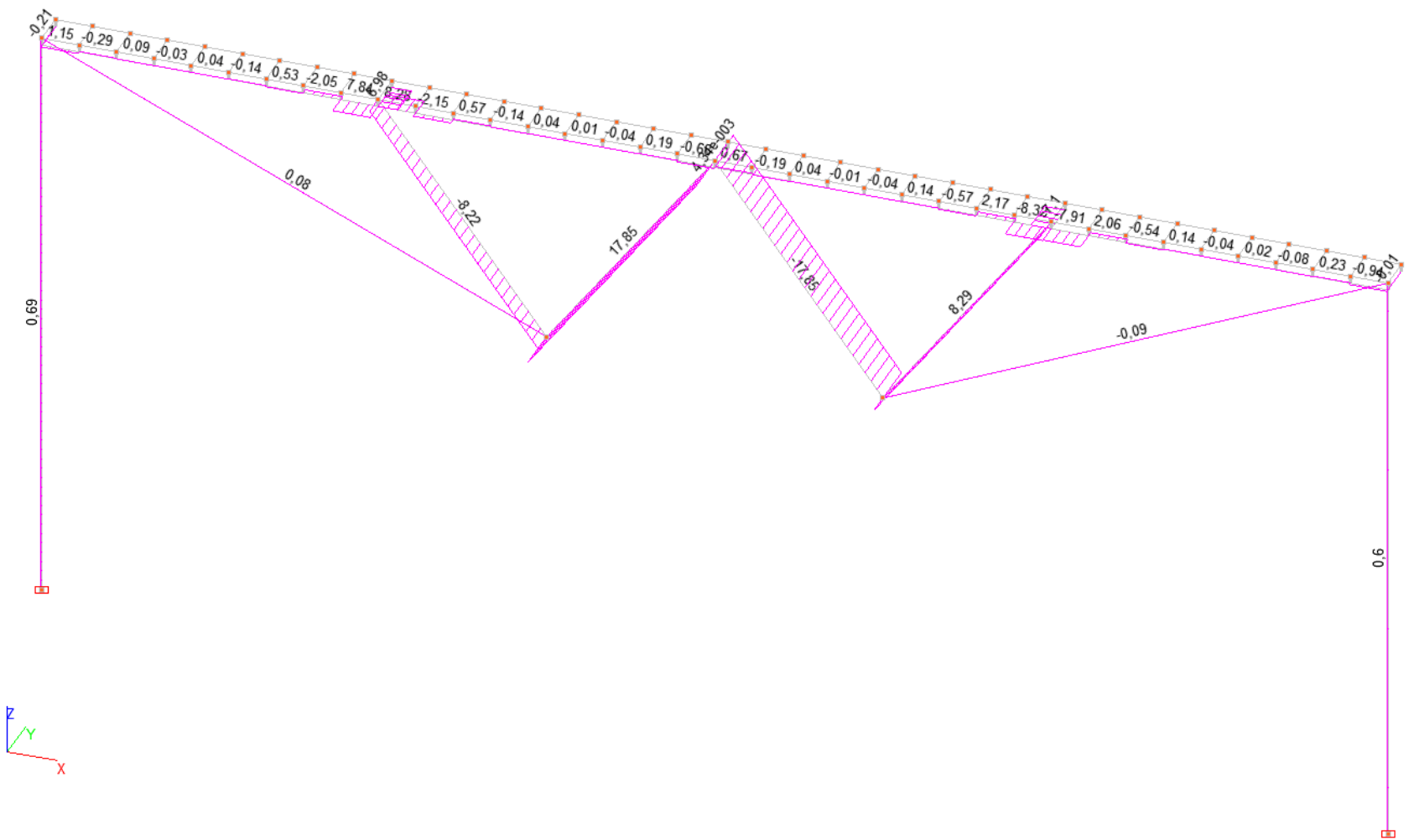


Рисунок 3.44 - Эпюра поперечных сил, (max - $Q_{ок} = 18,03$ кН)

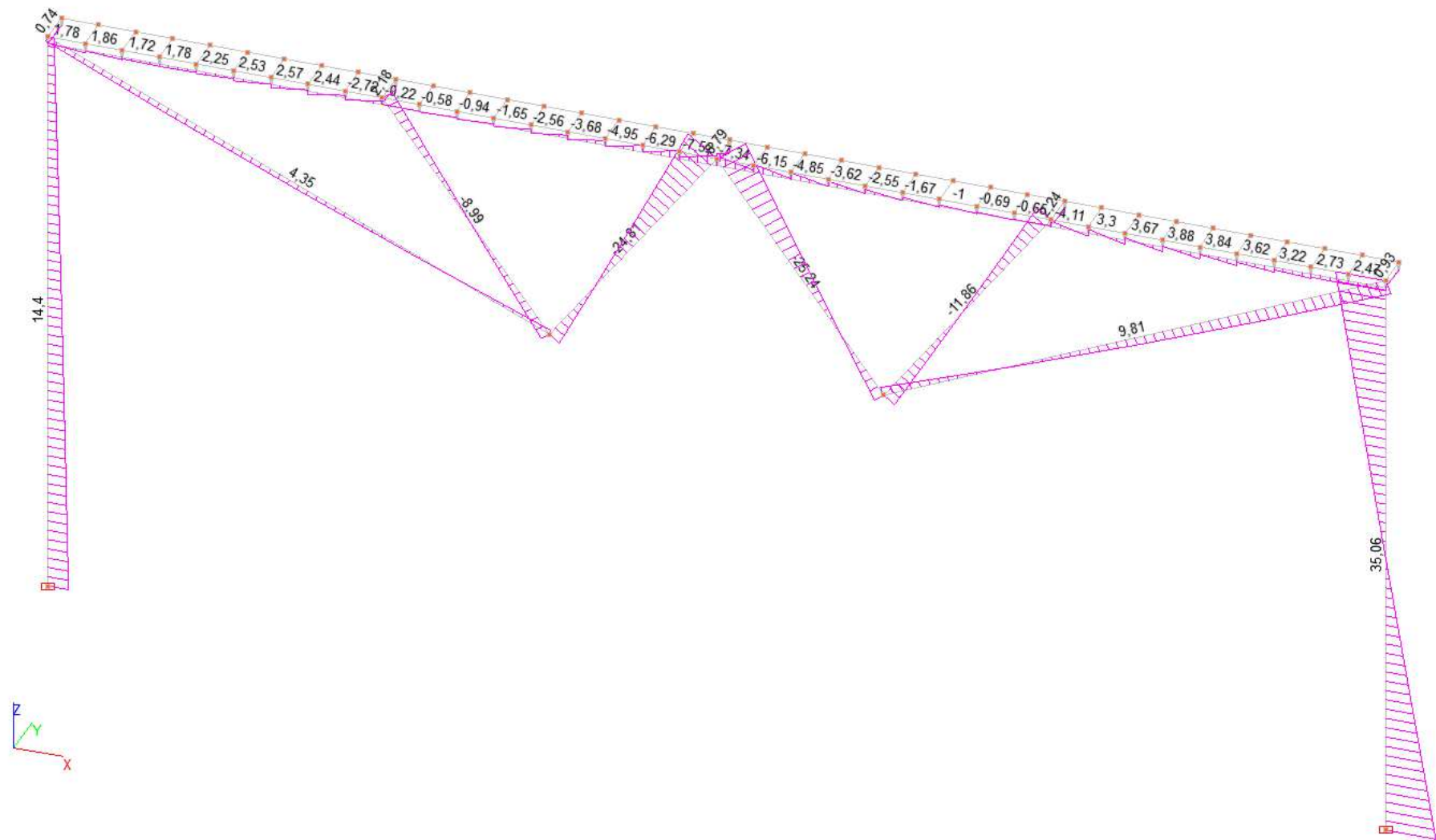


Рисунок 3.45 – Эпюра изгибающих моментов, (max - $M_{OK} = 47,93$ кН*м).

Выводы по главе 3

1) На основе полученных результатов можно сделать вывод, что самым выгодным подкреплением является шпренгельная плита с 1-ым вариантом подкрепления.

2) Полученные результаты расчетов показывают, что путем предварительного напряжения двух симметричных элементов нижнего пояса шпренгеля удалось уменьшить прогиб в расчетной точке (узле 582 до $W_{OK} = - 15,08$ мм. Но при этом максимальный изгибающий момент стал равным, $M_{x, OK} = 47,93$ кН*м, немного увеличился, максимальное напряжение, $Q_{OK} = 18,03$ кН увеличилось в 9 раз, максимальное значение продольного усилия $N = 523,54$ кН тоже увеличилось в 2 раза.

Глава 4. Регулирование напряженно- деформированного состояния строительных конструкций на примере комбинированной блок-фермы покрытия с помощью программного комплекса ANSYS

Эффективность пространственных конструкций на основе древесины по сравнению с плоскостными конструкциями давно известна. При этом, с увеличением пролетов эффективность возрастает. Легкость конструкций из дерева дает возможность (при равенстве суммарного веса) перевезти их в пять раз больше по сравнению с железобетонными, а следовательно, почти в пять раз сократить расходы на эти цели.

В этой связи, представляется весьма важным проводить техническую политику, ориентирующую изготовителей и потребителей на применение современных эффективных пространственных конструкций, в том числе блочного типа: плит на пролет, блок-ферм, блок-арок покрытий.

В Красноярском крае сложилась благоприятная ситуация: лесоматериалы являются местным ресурсом, создана местная производственная база.

4.1 Конструкции исследуемой блок-фермы покрытия

В данной магистерской диссертации исследуются напряженно-деформируемое состояние комбинированной блок-фермы покрытия.

Верхний пояс состоит из плиты с фанерной обшивкой по деревянному дощатому каркасу. Элементы нижнего пояса, растянутые раскосы, подвески предлагается выполнять из круглой стали. Сжатые элементы решетки запроектированы из парных стоек.

Ширина конструкции - 3 м. Высота – 3 м. Пролет – 18 м.

Выбор сорта, влажности и расчетных сопротивлений древесины, типа и марки клея:

Принимаем для деревянных элементов древесину хвойных пород – сосновые пиломатериалы первого сорта по ГОСТ 8486-86 и сортамента по ГОСТ 24454-80.

При нормальной постоянной влажности внутри отапливаемых помещений температурно-влажностные условия эксплуатации конструкций, согласно таблицам А [1] эксплуатационная влажность древесины не должна превышать 12 %, $m_b = 1$.

Расчетные сопротивления древесины сосны первого сорта назначаем согласно таблице 3 [1] с учетом необходимых коэффициентов условий работы.

Выбор марок сталей для стальных элементов фермы, расчетных сопротивлений стали и сварных соединений:

В зависимости от степени ответственности, а также от условий эксплуатации согласно приложению В [9] проектируемая ферма относится к группе 2, принимаем для элемента нижнего пояса блок-фермы сталь по ГОСТ 27772-88 марки С255 с расчетным сопротивлением растяжению, сжатию и изгибу по пределу текучести $R_y=260$ МПа.

Сбор нагрузок на блок-ферму:

1. Постоянная нагрузка

- Нагрузка от собственного веса металлических конструкций

- Нагрузку от собственного веса металлических конструкций задаем в программном комплексе с коэффициентом надежности по нагрузке равным 1,05 согласно [1].

2. Временная нагрузка

- Снеговая нагрузка

Нормативное значение нагрузки от снегового покрова рассчитано с помощью программы-сателлита «ВЕСТ» программного комплекса «SCAD Office». Результаты расчета приведены в приложении А.

Нормативное значение нагрузки от ограждающей конструкции покрытия составляет $0,13 \text{ Т/м}^2$. Коэффициент надежности по нагрузке равен 1,4. Расчетное значение нагрузки от ограждающей конструкции покрытия составляет $0,176 \text{ Т/м}^2$, следовательно снеговая нагрузка составляет $0,176 * 3 = 0,528 \text{ Т/м}^2$.

Мероприятия по защите элементов блок-фермы:

В соответствии с [12] конструктивные решения зданий и сооружений должны обеспечивать возможность периодического осмотра деревянных конструкций и возобновления защитных покрытий.

Защита деревянных конструкций от коррозии, вызываемой воздействием биологических агентов, предусматривает антисептирование, консервирование, покрытие лакокрасочными материалами или поверхностную пропитку составами комплексного действия.

Применяемые в конструкциях металлические элементы надлежит защищать от коррозии в соответствии с п. 5 [12].

При опирании несущих деревянных конструкций на конструкции из других материалов необходимо предусматривать установку гидроизоляционных прокладок.

1. Защитную обработку деревянных элементов производить после выборки гнёзд, снятия фасок, сверления отверстий.

2. Элементы цельного сечения - щит и элементы связей покрыть составом КДС-А - огнебиозащитное покрытие

3. Клеёные элементы - обработать за 2 раза пентафталевой эмалью ПФ115 - лакокрасочное влагостойкое покрытие.

4. Торцы элементов обмазать герметиком У-30м.

5. Металлические детали окрасить за 2 раза пентафталевой эмалью ПФ115 по грунтовке.

4.2 Конечно-элементная модель комбинированной блок-фермы покрытия в программном комплексе ANSYS

На первом этапе создается основа конечно-элементной модели исследуемой блок-фермы.

Физический тип задачи – механика деформируемого тела.

Задаем тип конечного элемента в зависимости от размерности объекта и других его свойств.

Конструкции пролетного строения: плита замоделирована узловыми конечными оболочечными элементами SHELL, работающими на растяжение-сжатие и изгиб в двух направлениях; элементы стоек, затяжек, поперечных балок представлены балочными элементами BEAM.

При выполнении работы учитываем геометрическую нелинейность и критерий разрушения Друкера — Прагера.

Учет нелинейной работы конструкции позволяет осуществлять построение адекватных расчетных схем, выявлять дополнительные резервы несущей способности, снижать материалоемкость, обеспечивать конструктивную безопасность, осуществлять моделирование процессов жизненного цикла конструкций – процесс нагружения, процесс возведения, процесс изменения НДС конструкции во времени, устойчивость от прогрессирующего обрушения.

Геометрическая нелинейность — имеет место, когда перемещения конструкции вызывают значительное изменение ее геометрии, так что уравнения равновесия приходится составлять с учетом изменения формы и размеров конструкции, т. е. по деформированной схеме.

При моделировании блок-фермы использовались материалы из библиотеки ANSYS.

Пространственная стержневая модель комбинированной блок-фермы покрытия изображена на рисунке 4.1.

Click an object. Double-click to select an edge loop. Triple-click to select a solid.

Ansys
2021 R2
STUDENT

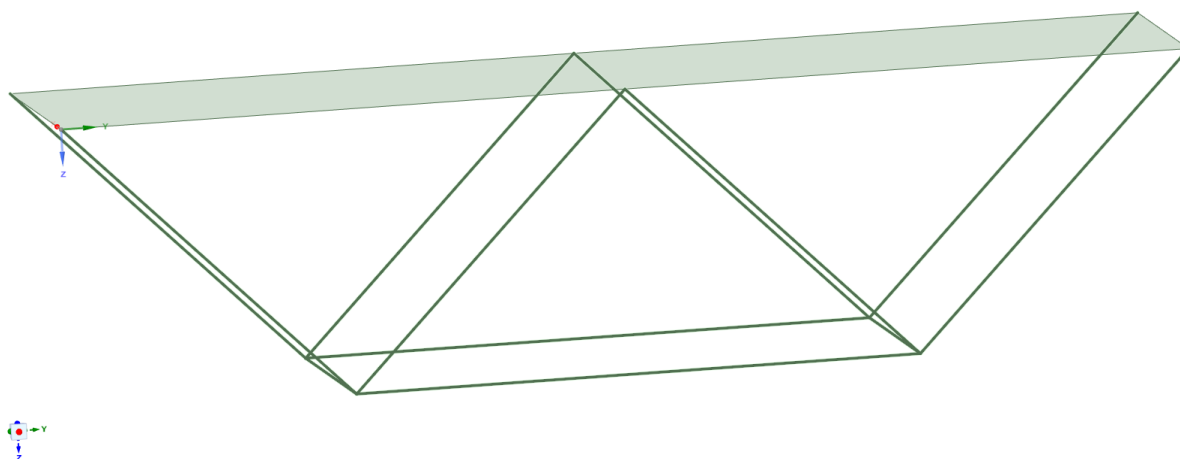


Рисунок 4.1 - Пространственная стержневая модель комбинированной блок-фермы покрытия

Сгенерированная сетка модели блок-фермы покрытия изображена на рисунке 4.2.

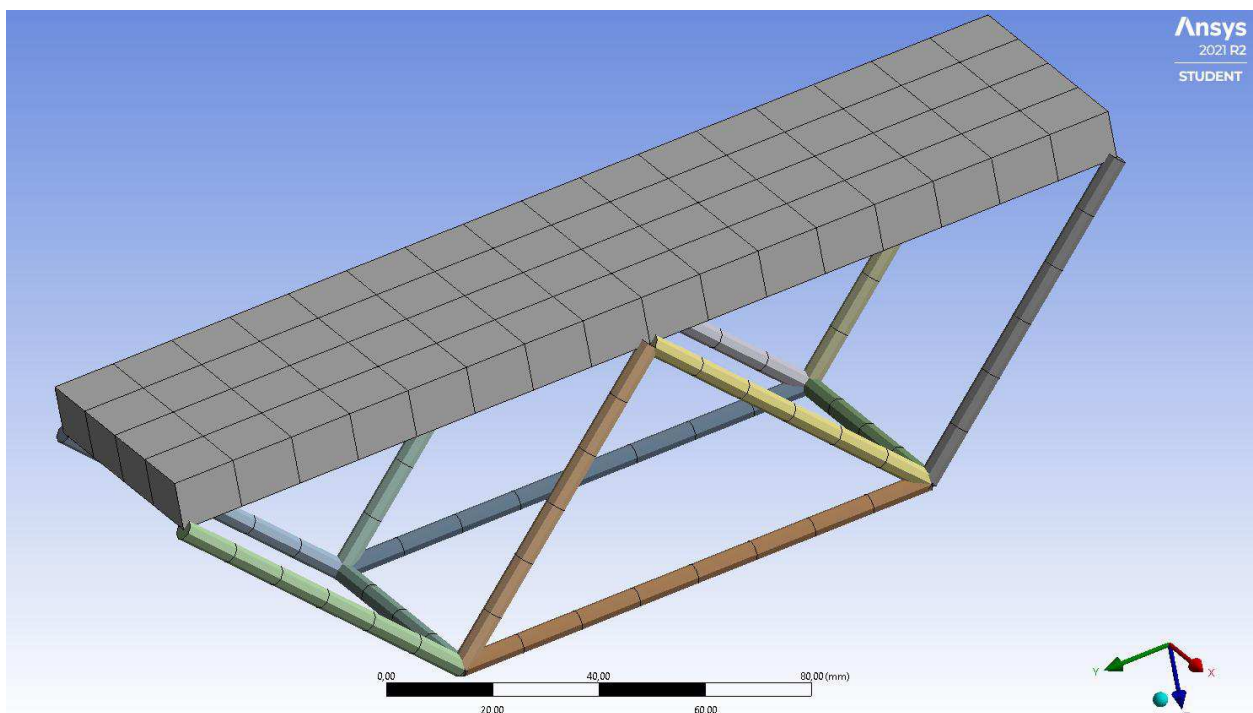


Рисунок 4.2 – Сгенерированная сетка модели блок-фермы

Для расчетной схемы были приняты следующие граничные условия:

1 тип граничных условий: На опорах задавались шарнирно подвижная (справа) и неподвижная (слева) связи (RemoteDisplacement), которые обеспечивает фиксацию блок-фермы в вертикальном положении;

2 тип граничных условий: Учитываем собственный вес конструкций и задаем с помощью Standard Earth Gravity и временная нагрузка - снеговая нагрузка 0,5МПа (Pressure).

На рисунке 4.3 изображена схема загрузки модели блок-фермы покрытия.

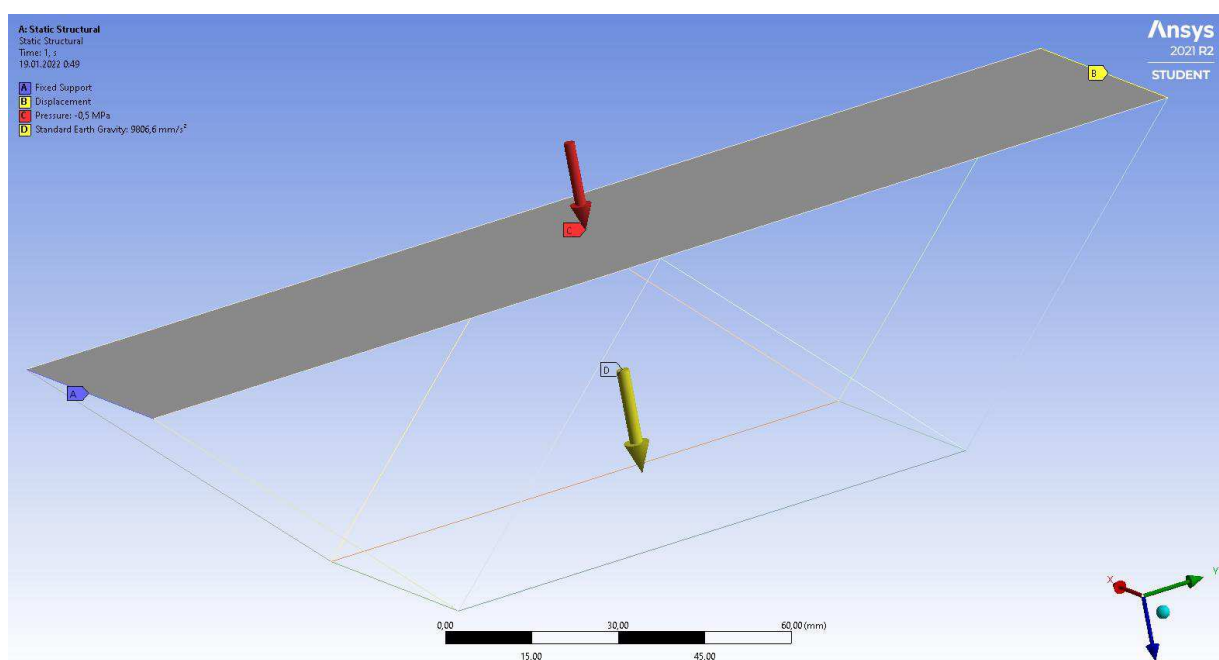


Рисунок 4.3 – Схема загрузки модели блок-фермы покрытия

Для статического расчета используем модуль Static Structural, который выполняет статический прочностный расчет конструкций.

Решаем шаговым методом, количество шагов нагружения 1.

4.3 Численное исследование напряженно-деформированного состояния модели комбинированной блок-фермы покрытия путем предварительного напряжения нижнего пояса

Для решения задачи регулирования НДС блок фермы покрытия предварительным напряжением следует выполнить следующие расчеты в программном комплексе ANSYS:

1. Статический расчет стержневой расчетной схемы блок-фермы;
2. Статический расчет стержневой расчетной схемы блок-фермы с учетом геометрической нелинейности;
3. Статический расчет стержневой расчетной схемы блок-фермы с учетом геометрической нелинейности и предварительного напряжения.

4.3.1 Статический расчет стержневой расчетной схемы блок-фермы

На рисунке 4.4 представлены общие перемещения блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса конструкции и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролет.

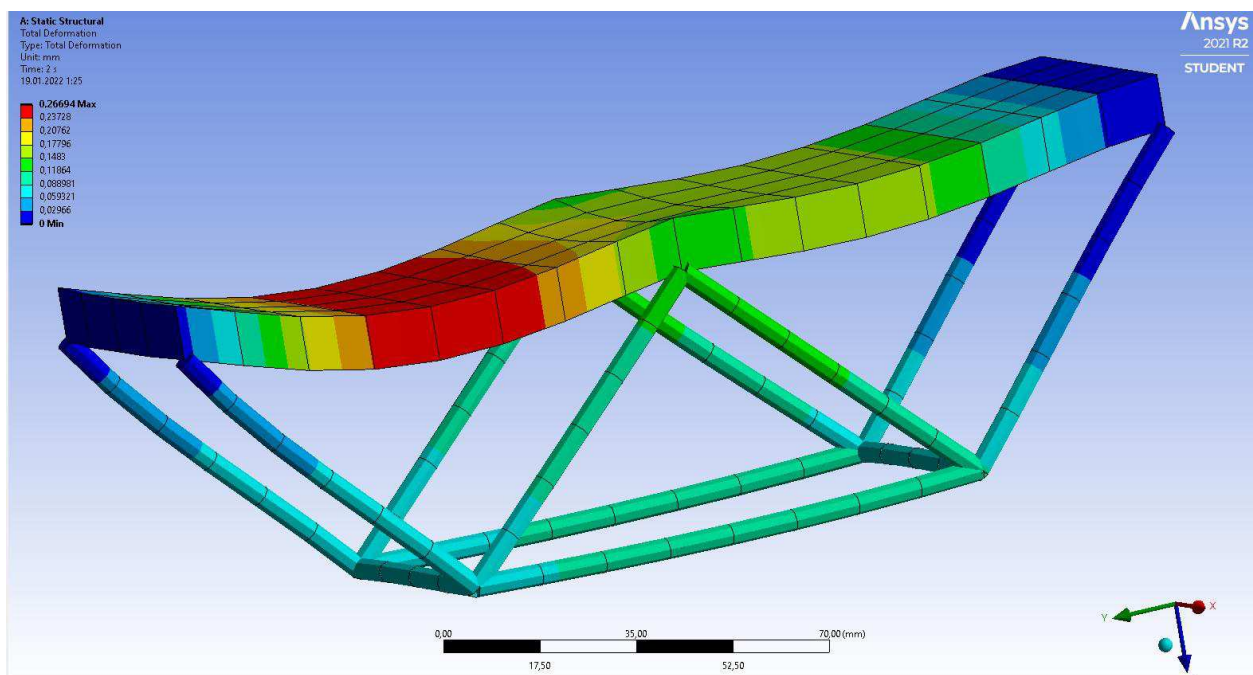


Рисунок 4.4 – Общие перемещения, мм

Максимально предельный прогиб согласно СП 20.13330.2016

$$f_u = \frac{l}{240}, \quad (1)$$

где l - длина пролета, м.

$$f_u = \frac{18000}{240} = 75 \text{ мм.}$$

Значение максимального перемещения 0,27 мм, что не превышает предельно допустимого.

На рисунке 4.5 представлены значения напряжений в плите модели блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса конструкции и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролет.

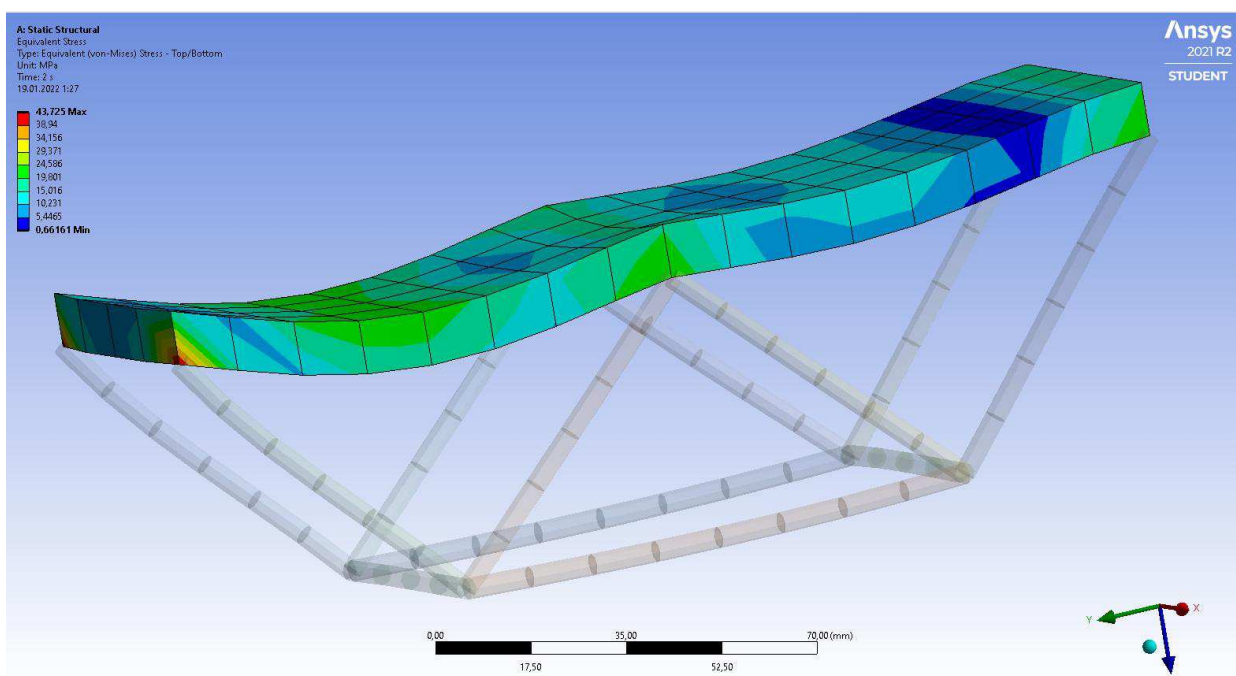


Рисунок 4.5 – Напряжения в плите модели блок-фермы при статическом расчете без учета геометрической нелинейности, МПа

Максимальное значение напряжения, возникающее в плите $\sigma_{\max} = 43,72$ МПа.

На рисунке 4.6 представлены значения напряжений стальных элементов модели блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролет.

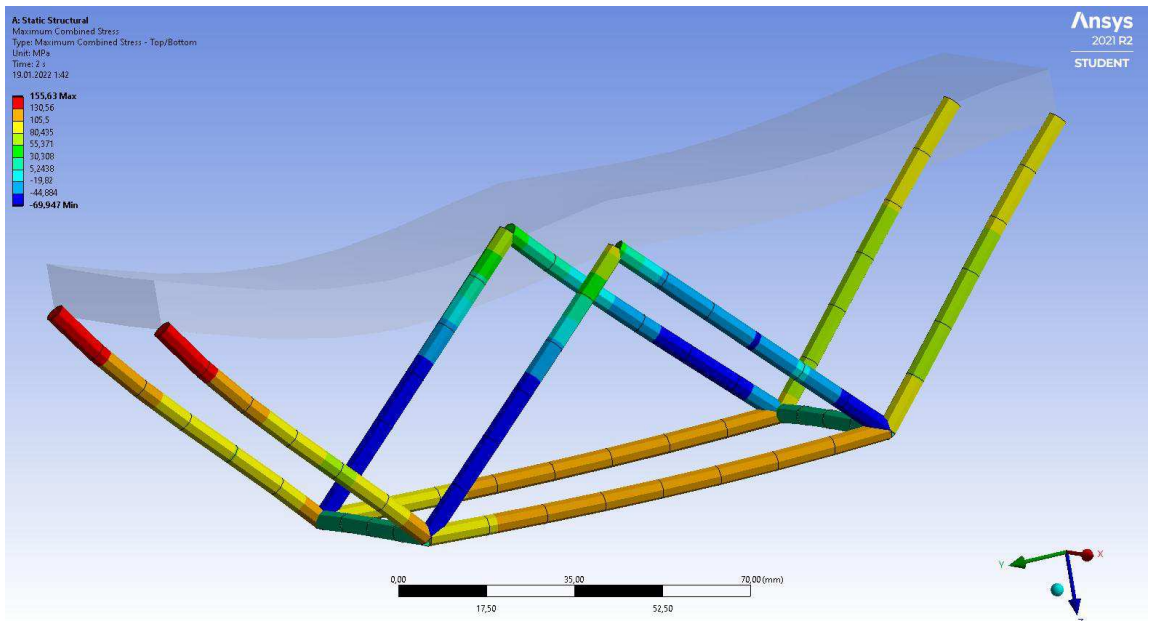


Рисунок 4.6 – Напряжения стальных элементов модели при статическом расчете без учета геометрической нелинейности, МПа

Максимальное значение напряжения $\sigma_{\max} = 155,63$ МПа.

На рисунке 4.7 представлены значения изгибающего момента модели блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролет.

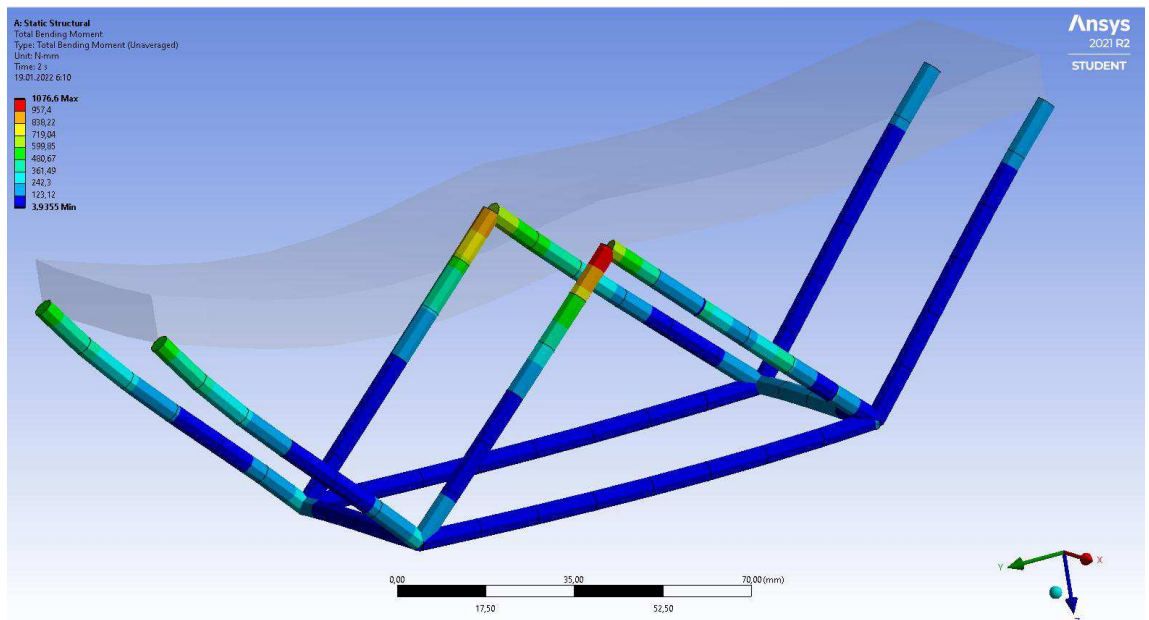


Рисунок 4.7 – Изгибающий момент при статическом расчете без учета геометрической нелинейности, Н·мм

Максимальный изгибающий момент $M_{\max} = 1076,6$ Н·мм.

Результаты статического расчета модели пешеходного арочного моста без учета геометрической нелинейности представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты статического расчета без учета геометрической нелинейности

Результаты статического расчета	Значение
Максимальные перемещения, мм	0,27
В плите σ_{\max} , МПа	43,72
В стальных элементах σ_{\max} , МПа	155,63
M_{\max} , Н·мм	1076,6

4.3.2 Статический расчет стержневой расчетной схемы блок-фермы с учетом геометрической нелинейности

На рисунке 4.8 представлены общие перемещения блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса конструкции и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролетс учетом геометрической нелинейности.

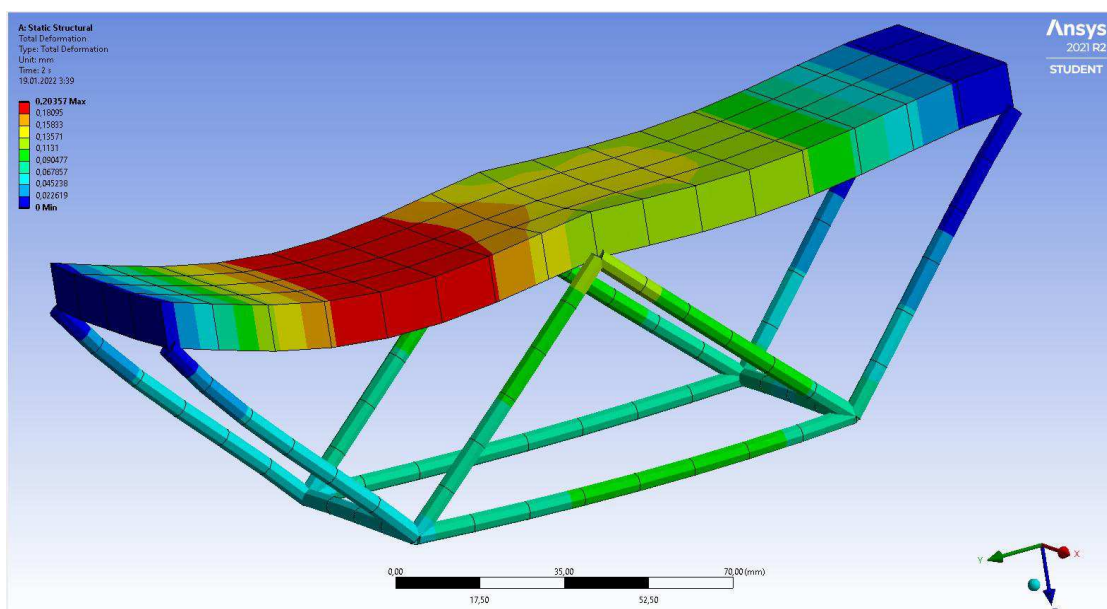


Рисунок 4.8 – Общие перемещения с учетом геометрической нелинейности, мм

Значение максимального перемещения 0,20 мм, что не превышает предельно допустимого.

На рисунке 4.9 представлены значения напряжений в плите модели блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса конструкции и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролет с учетом геометрической нелинейности.

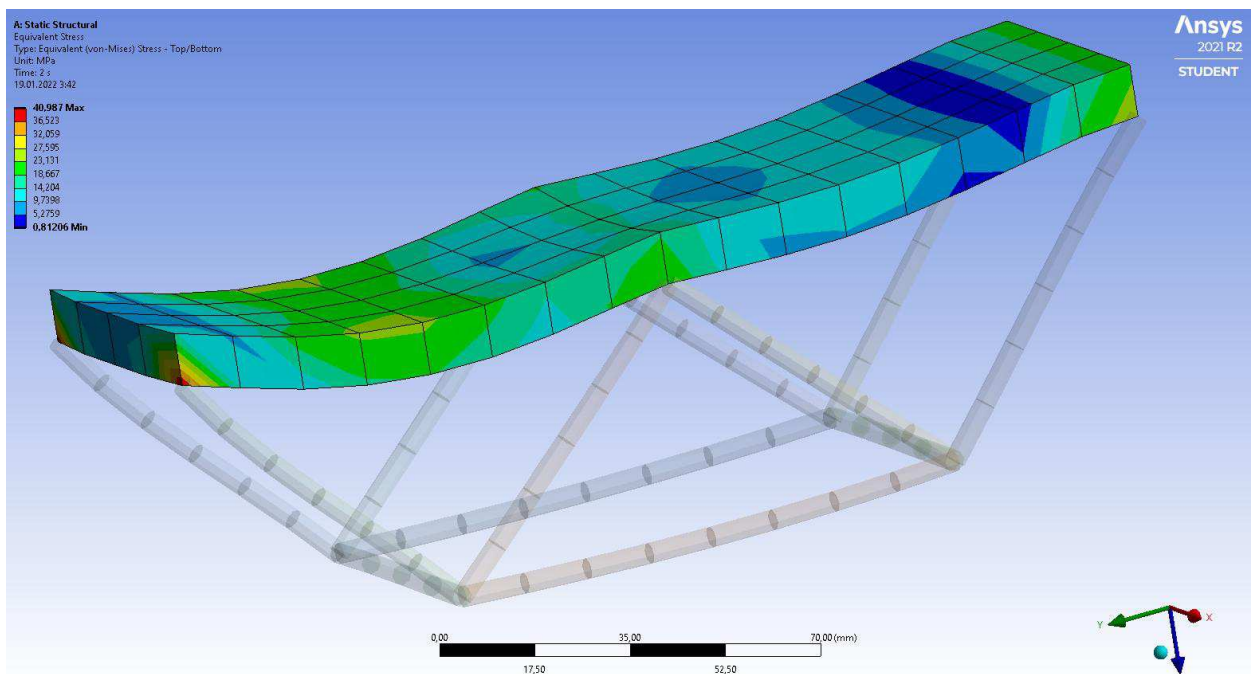


Рисунок 4.9 – Напряжения в плите модели блок-фермы при статическом расчете с учетом геометрической нелинейности, МПа

Максимальное значение напряжения, возникающее в плите с учетом геометрической нелинейности $\sigma_{\max} = 40,98$ МПа.

На рисунке 4.10 представлены значения напряжений стальных элементов модели блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролет с учетом геометрической нелинейности.

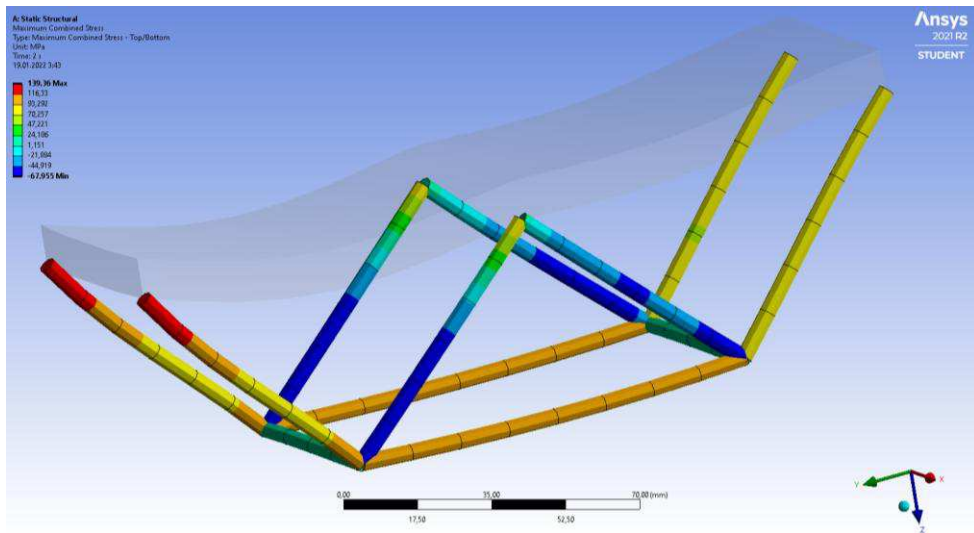


Рисунок 4.10 – Напряжения стальных элементов модели при статическом расчете без учета геометрической нелинейности, МПа

Максимальное значение напряжения с учетом геометрической нелинейности $\sigma_{\max} = 139,36$ МПа.

На рисунке 4.11 представлены значения изгибающего момента модели блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролетс учетом геометрической нелинейности.

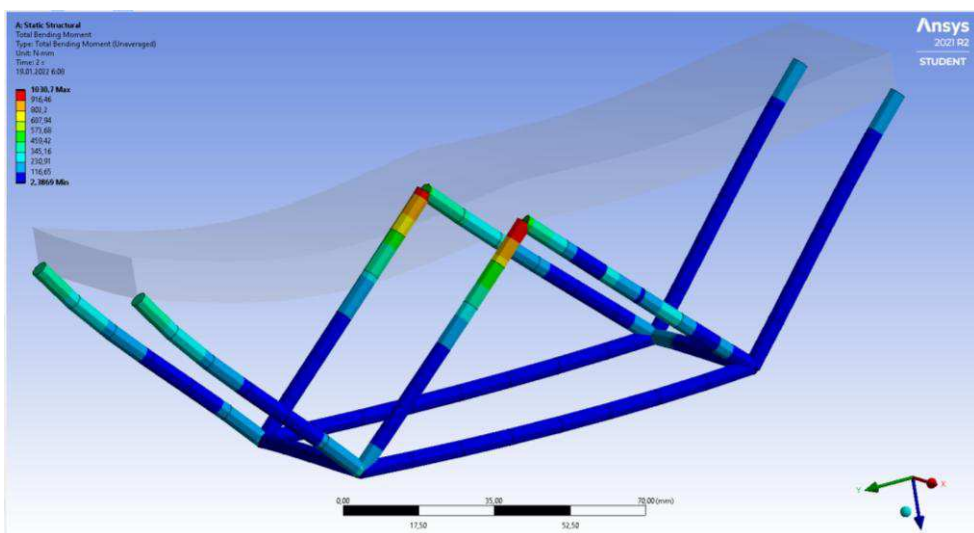


Рисунок 4.11 – Изгибающий момент при статическом расчете без учета геометрической нелинейности, Н·мм

Максимальный изгибающий момент с учетом геометрической нелинейности $M_{\max} = 1030,7$ Н·мм.

Результаты статического расчета модели пешеходного арочного моста с учетом геометрической нелинейности представлены в таблице 3.2.

Таблица 4.2 – Результаты статического расчета с учетом геометрической нелинейности

Результаты статического расчета	Значение
Максимальные перемещения, мм	0,20
В плите σ_{\max} , МПа	40,98
В стальных элементах σ_{\max} , МПа	139,36
M_{\max} , Н·мм	1076,6

Сравнения результатов статического расчета с учетом и без учета геометрической нелинейности модели блок-фермы покрытия представлены в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Сравнение результатов статических расчетов

Результаты статического расчета	Стат.расчет без учета геом. нелинейности	Стат.расчет с учетом геом. нелинейности	Несходимость, %
Максимальные перемещения точек плиты, мм	0,27	0,20	25,92
В плите σ_{\max} , МПа	43,72	40,98	6,27
В стальных элементах σ_{\max} , МПа	155,63	139,36	10,45
M_{\max} , Н·мм	1076,6	1030,7	4,26

При анализе возникающих усилий и перемещений были сделаны следующие выводы:

При учете геометрической нелинейности в статическом расчете перемещения в стержневой модели уменьшились на 25,92%.

При учете геометрической нелинейности в статическом расчете напряжения в стержневой модели уменьшились (в плите на 6,27%, а в стальных элементах на 10,45%).

При учете геометрической нелинейности в статическом расчете значение максимального изгибающего момента в стержневой модели уменьшились на 4,26%.

С учетом сделанных выводов поставлена, следующая задача:

Выполнить расчет стержневой модели блок-фермы в статической постановке с учетом геометрической нелинейности и предварительным напряжением стальных элементов.

4.3.3 Статический расчет стержневой расчетной схемы блок-фермы с учетом геометрической нелинейности и предварительного напряжения наклонных элементов шпренгеля

Зададим значения преднапряжений выбранной паре наклонных элементов шпренгеля в зависимости от величины напряжения возникающего в них, с помощью инструмента BoltPretension рисунок 4.12.

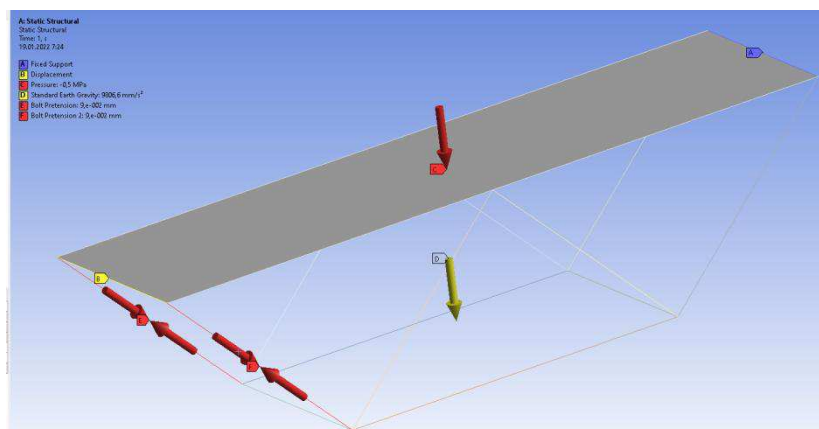


Рисунок 4.12 – Предварительно напряженные наклонные элементы шпренгеля

На рисунке 4.13 представлены общие перемещения блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса конструкции и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролет с учетом геометрической нелинейности и с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля.

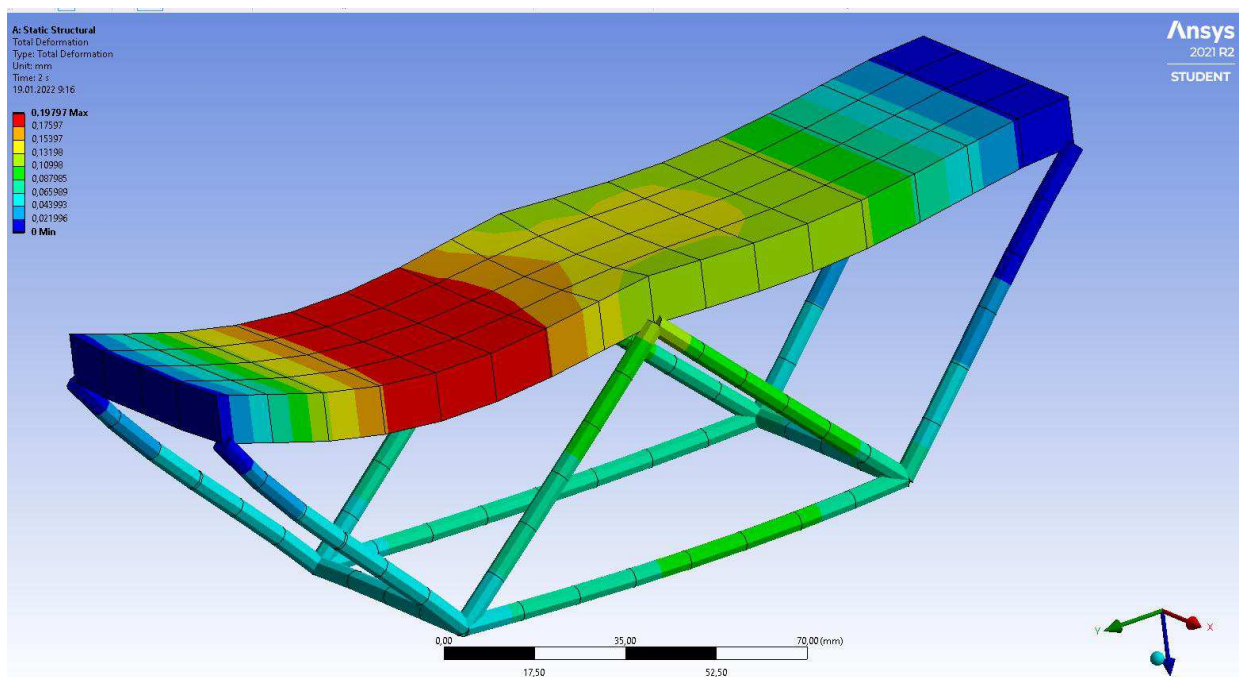


Рисунок 4.13 – Общие перемещения при статическом расчете с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля, мм
Значение максимального перемещения 0,19 мм.

На рисунке 4.14 представлены значения напряжений в плите модели блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса конструкции и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролет с учетом геометрической нелинейности и с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля.

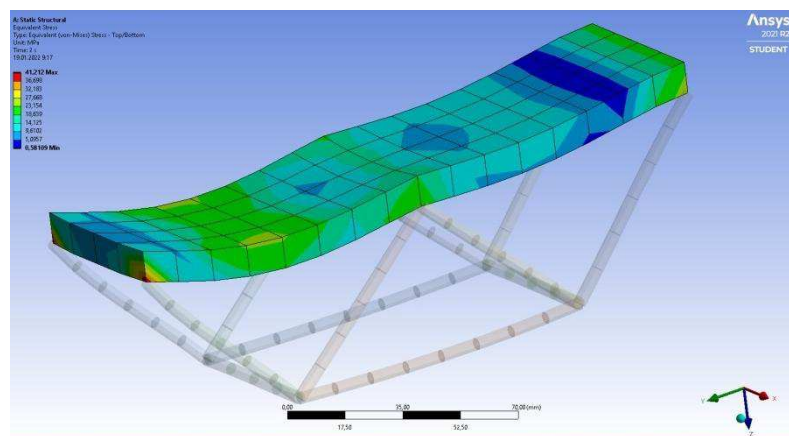


Рисунок 4.14 – Напряжения в плите модели блок-фермы при статическом расчете с учетом геометрической нелинейности и с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля, МПа

Максимальное значение напряжения, возникающее в плите $\sigma_{\max} = 41,21$ МПа.

На рисунке 4.15 представлены значения напряжений стальных элементов модели блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролет с учетом геометрической нелинейности и с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля.

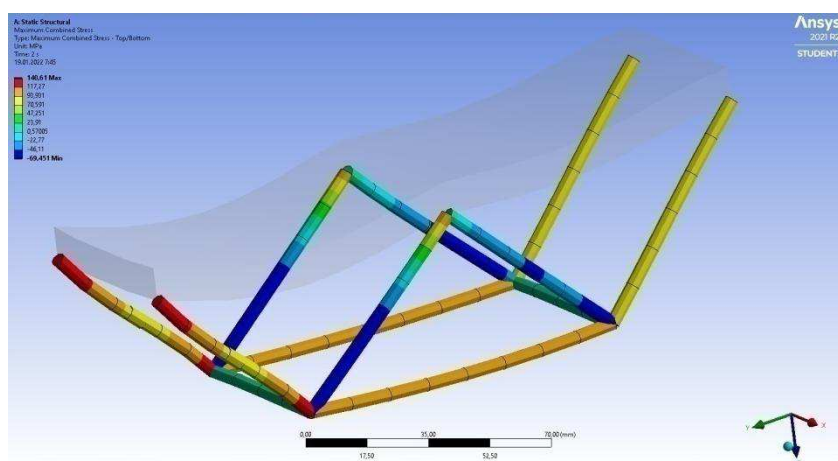


Рисунок 4.15 – Напряжения стальных элементов модели при статическом расчете с учетом геометрической нелинейности и с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля, МПа

Максимальное значение напряжения $\sigma_{\max} = 139,50$ МПа.

На рисунке 4.16 представлены значения изгибающего момента модели блок-фермы покрытия при воздействии статической нагрузки от собственного веса и нагрузки от снега 0,5 МПа на весь пролет с учетом геометрической нелинейности и с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля.

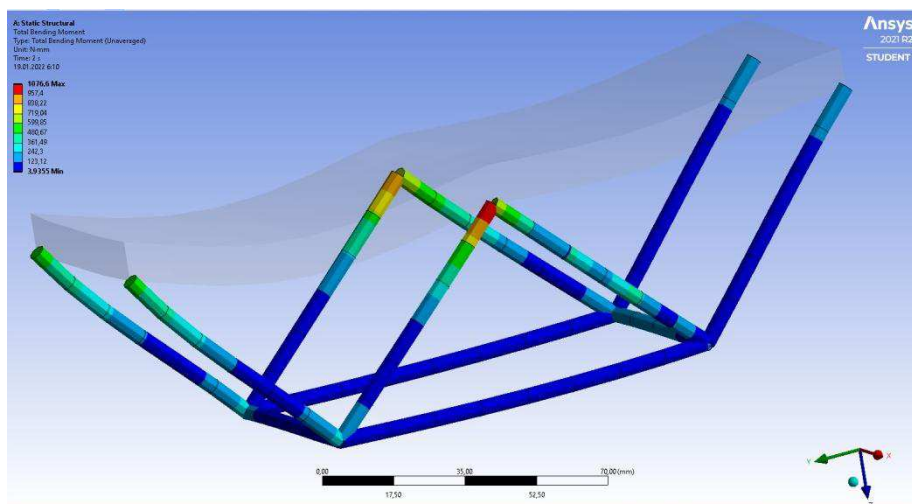


Рисунок 4.16 – Изгибающий момент при статическом расчете с учетом геометрической нелинейности и с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля, Н·мм

Максимальный изгибающий момент $M_{\max} = 1045,6 \text{ Н}\cdot\text{мм}$.

Результаты статического расчета модели блок-фермы покрытия с учетом геометрической нелинейности и с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты статического расчета с учетом геометрической нелинейности и с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля

Результаты статического расчета	Значение
Максимальные перемещения, мм	0,19
В плите σ_{\max} , МПа	41,21
В стальных элементах σ_{\max} , МПа	139,50
M_{\max} , Н·мм	1045,6

Анализ полученных результатов

Для оценки эффективности регулирования НДС блок-фермы покрытия предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля выполнено сравнение результатов статических расчетов, а именно сравнение значений результатов общих перемещений плиты, возникающих напряжений в плите и в стальных элементах и изгибающих моментов.

Результаты расчетов представлены на рисунках 4.17- 4.20.



Рисунок 4.17 – Сравнение результатов макс. перемещений плиты статического расчета модели блок-фермы с различными условиями, мм



Рисунок 4.18 – Сравнение результатов напряжений в плите статического расчета модели блок-фермы с различными условиями, МПа



Рисунок 4.19 – Сравнение результатов напряжений в стальных элементах статического расчета модели блок-фермы с различными условиями, МПа



Рисунок 4.20– Сравнение значений изгибающего момента при статическом расчете модели блок-фермы с различными условиями, МПа

Сравнение результатов статического расчета модели блок-фермы с различными условиями приведены в таблице 3.5.

Таблица 4.5 – Сравнений результатов статических расчетов при различных условиях

Результаты статического расчета	Стат. расчет без учета геом. нелинейности	Стат. расчет с учетом геом. нелинейности	Стат. расчет с учетом геом. нелинейности и предварит.напряж. наклонных элементов шпренгеля
Максимальные перемещения, мм	0,27	0,20	0,19
В плите $\sigma_{\max}, \text{МПа}$	43,72	40,98	41,21
В стальных элементах $\sigma_{\max}, \text{МПа}$	155,63	139,36	139,50
$M_{\max}, \text{Н}\cdot\text{мм}$	1076,6	1030,7	1045,6

Вывод по главе 4

Проанализировав результаты выполненного расчета, делаем выводы:

1. Перемещения плиты блок-фермы покрытия уменьшились на 29,62 %;
2. Значение максимального изгибающего момента уменьшилось на 2,87 %;
3. Максимальное напряжение в плите уменьшилось на 5,74 %, в стальных элементах шпренгеля на 10,36 %.

Удалось значительно уменьшить перемещения плиты блок-фермы покрытия, и немного уменьшить значение максимального изгибающего момента. Цель регулирования выполнена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Оценка современного состояния способов регулирования НДС конструкций позволила выбрать преднапряжение элементов шпренгеля как наиболее эффективный способ регулирования НДС для блок-фермы покрытия.

2 Проведенный анализ различных вариантов шпренгелей позволил сделать вывод, что самым выгодным подкреплением является первый вариант. Полученные результаты расчетов на статические и динамические нагрузки в программном комплексе SCAD показывают, что путем предварительного напряжения двух симметричных элементов нижнего пояса шпренгеля удалось уменьшить прогиб в расчетной точке (узле 582 до $W_{OK} = - 15,08$ мм. Но при этом максимальный изгибающий момент стал равным, $M_{x,OK} = 47,93$ кН*м, немного увеличился.

3 Создана пространственная конечно-элементная модель комбинированной блок-фермы покрытия, а также выполнен статический расчет стержневой модели в программном комплексе ANSYS.

4 Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы: геометрическую нелинейность, вызванную перемещением элементов конструкций, следует учитывать при расчете систем, в которых ее учет вызывает изменение усилий и перемещений более чем на 5 %. При данном статического расчете модели пространственной блок-фермы покрытия допускается не учитывать геометрическую нелинейность, т.к. несходимость результатов менее чем 5%.

5 Выполнены численные исследования по регулированию напряжённо- деформированного состояния пространственной блок-фермы покрытия, используя алгоритмы регулирования конструкций преднапряжением элементов нижнего пояса. Перемещения плиты блок-фермы покрытия уменьшились на 29,62 %; Значение максимального изгибающего момента уменьшилось на 2,87 %;

Максимальное напряжение в плите уменьшилось на 5,74 %, в стальных элементах шпренгеля на 10,36 %.

6 Проанализировав результаты численных исследований, способов подкрепления плиты шпренгелем, можно сделать вывод о том, что алгоритм регулирования является мощным средством повышения эффективности строительных конструкций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Абовский, Н.П. Современное состояние и перспективы развития систем автоматического управления напряженно-деформируемым состоянием конструкций / Абовский Н.П., Воловик Ю.А., Палагушкин В.И. // Пространственные конструкции в Красноярском крае: межвуз. темат. сб. науч. Тр. / КИСИ.- Красноярск, 1992.- С.16-52.

2 Инжутов, И. С. Конструктивные схемы предварительно напряженных конструкций, комбинированных на основе древесины / И. С. Инжутов, П. А. Дмитриев, С. В. Деордиев, А. Ф. Рожков // Вестник Красноярской государственной архитектурно-строительной академии: сб. науч. трудов. Вып. 8; под ред. В. Д. Надеяева. – Красноярск: КрасГАСА, 2005. – С. 54-60.

3 Современные аспекты активного обучения. Строительная механика. Теория упругости. Управление строительными конструкциями: учеб. пособие; 3-е изд., перераб. и доп. / под ред. Н.П. Абовского; Н.П. Абовский, Л. В. Енджиевский, В.И. Савченков, А.П. Деруга, Н.И.Марчук, Г.А. Стерехова, В.И. Палагушкин, Н.П. Андреев, П.А. Светашков, О.М. Максимова. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2008. – 407 с.

4 Абовский, Н.П. Активное управление конструкциями при статических и динамических воздействиях / Н.П. Абовский, О.М. Максимова, В.И. Палагушкин. Белорусский конгресс «Механика – 99», Минск, 1999.

5 Абовский, Н. П. Управляемые конструкции: учеб. пособие / Н. П. Абовский. Красноярск: КрасГАСА, 1998. – 433с.

6 Алехин, В. Н. Анализ НДС фрагмента рамы при регулировании усилий в узлах / В. Н. Алехин // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РАСН. – 2011. – № 1. – С.83-85.

7 Байков, В. Н. Железобетонные конструкции. Общий курс: учебник для вузов/ В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1991. – 767 с.

8 Беленя, Е. И. Предварительно напряженные металлические несущие конструкции : монография / Е. И. Беленя. – Москва :Госстройиздат, 1963. – 324 с.

9 Воеводин, А. А. Предварительно напряженные системы элементов конструкций : монография / А. А. Воеводин. – Москва :Стройиздат, 1963. – 324 с.

10 Гайдаров, Ю. В. Предварительно напряженные металлические конструкции: монография / Ю. В. Гайдаров. – Ленинград :Стройиздат, 1971. – 145с.

11 Егоров, В. В. Развитие конструктивных форм и методов расчета комбинированных систем шпренгельного типа :дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.01/ Егоров Владимир Викторович. – Санкт-Петербург, 2004. – 535с.

12 Марчук, Н. И. Решение задач регулирования напряженно-деформированного состояния конструкций с использованием ПЭВМ / Н. И. Марчук, Д. П. Фиферова, И. А. Тиунова // Молодежь и наука: сборник материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края. Сиб. федер. ун-т. – Красноярск, 2014.

13 Мельников, Н. П. Металлические конструкции. Современное состояние и перспективы развития: монография / Н. П. Мельников. – Москва: Стройиздат, 1983. – 541с.

14 Михайлов, В. В. Предварительно напряженные железобетонные конструкции: (теория, расчет и подбор сечений) : монография / В. В. Михайлов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва :Стройиздат, 1978. – 383с.

15 Палагушкин, В.И. Анализ, регулирование и управление напряженно- деформированным состоянием конструкций /В.И. Красноярск. Матер. ХУШ регион. Научно-техн. Конф. / Красноярск. : КрасГАСА, 2000. – с.60-61

16 Регулирование конструкций: лабораторный практикум по строительной механике /Н.П. Абовский, Ю.А. Воловик, Г.А. Стерехова, Н.И. Марчук, В.И. Палагушкин. – Красноярск :, КИСИ, 1993. – 54с.

17 Регулирование. Синтез. Оптимизация. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости: учеб. Пособие для вузов/ Н. П. Абовский [и др.]; под общ. ред. Н. П. Абовского. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Москва: Стройиздат, 1993. – 456 с

18 Рожков, А.Ф. Управляемые блок-секции с предварительно напряженными деревянными элементами: дис. канд. тех. наук: 05.23.01 / Рожков Александр Федорович. – Красноярск, 2006. – 191с.

19 Сазанцев, Е.В. Регулирование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций путем предварительного напряжения их элементов: дис. магистра: 08.04.01.03 / Сазанцев Евгений Владимирович. – Красноярск, 2016. – 118с.

20 Саламатов, Ю.П. Идеализация технических систем. Исследование и разработка пространственно-временной модели эволюции технических систем: Рукопись / Ю.П. Саламатов, И.М. Кондаков. - Красноярск, 1984.

21 СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*.– Введ. 28.08.2017. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 148с.

22 СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – Введ. 04.06.2017. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 95с.

23 Ференчик, П. Предварительно напряженные стальные конструкции: учебное пособие / П. Ференчик, М. Тохачек; перевод с немецкого Е. Ш. Фельдмана. – Москва: Стройиздат, 1979. – 423с.

24 Голевко, Е. С. Регулирование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций путем предварительного напряжения их элементов: дис. магистра: 08.04.01.03 / Голевко Екатерина Сергеевна – Красноярск, 2020. – 67с.

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

Инженерно-строительный институт
институт
Строительных конструкций и управляемых систем
кафедра

Тема магистерской диссертации

*РЕГУЛИРОВАНИЕ НДС СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ*

08.04.01 Строительство
08.04.01.03 Теория и проектирование зданий и сооружений

Научный руководитель, доцент, к. т. н. В. И. Палагушкин
Магистрант гр. СФ20-03М Е. В. Поляков

Красноярск 2022

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Регулирование напряженно-деформированного состояния комбинированной блок-фермы покрытия преднапряжением элементов нижнего пояса при статических и динамических нагрузках.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ:

- выполнить оценку современного состояния вопроса проектирования предварительно напряженных конструкций и способов эффективного регулирования напряженно-деформированного состояния конструкций, путем создания предварительно напряжения;

- создать расчетную схему пространственной блок-фермы покрытия, а также выполнить статический расчет стержневой модели в программном комплексе SCAD;

- выбор типа шпренгеля для создания наиболее эффективного НДС плиты;

- выполнить численные исследования по регулированию напряженно-деформированного состояния пространственной блок-фермы покрытия используя алгоритмы регулирования конструкций преднапряжением элементов в программном комплексе ANSYS;

- анализ полученных результатов численных исследований для дальнейшего проектирования регулируемых конструкций.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ:

- пространственная блок-ферма покрытия.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА:

- результаты численных исследований по регулированию напряженно-деформированного состояния пространственной комбинированной блок-фермы покрытия на действие статических и динамических нагрузок.

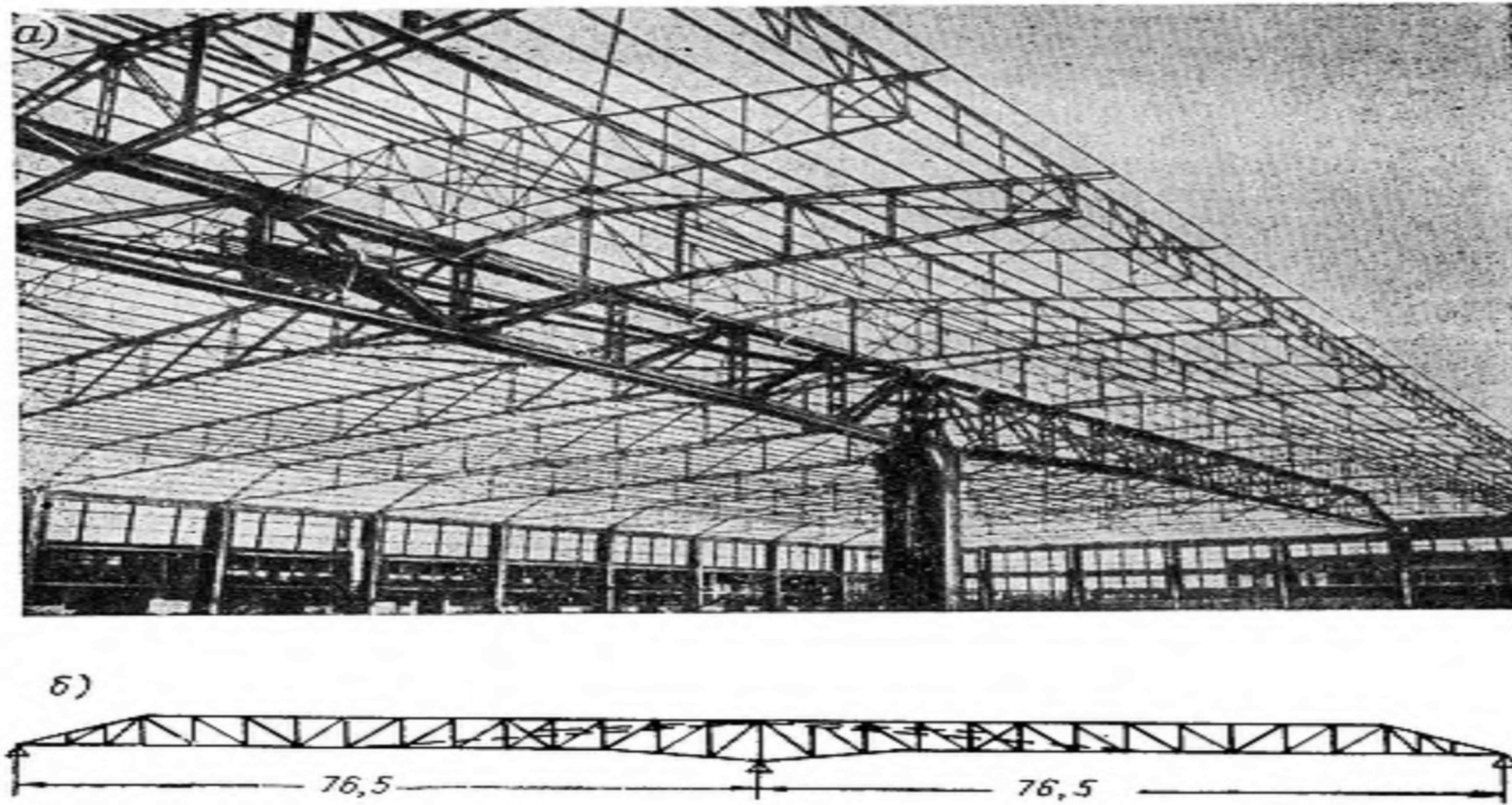
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ:

- выполненные автором исследования могут быть использованы при проектировании и реконструкции пространственных блок-ферм покрытий.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ:

- численное исследование с использованием алгоритма регулирования, разработанного коллективом кафедры «Строительные конструкции и управляемые системы» ИСИ СФУ совместно с программными комплексами SCAD и ANSYS.

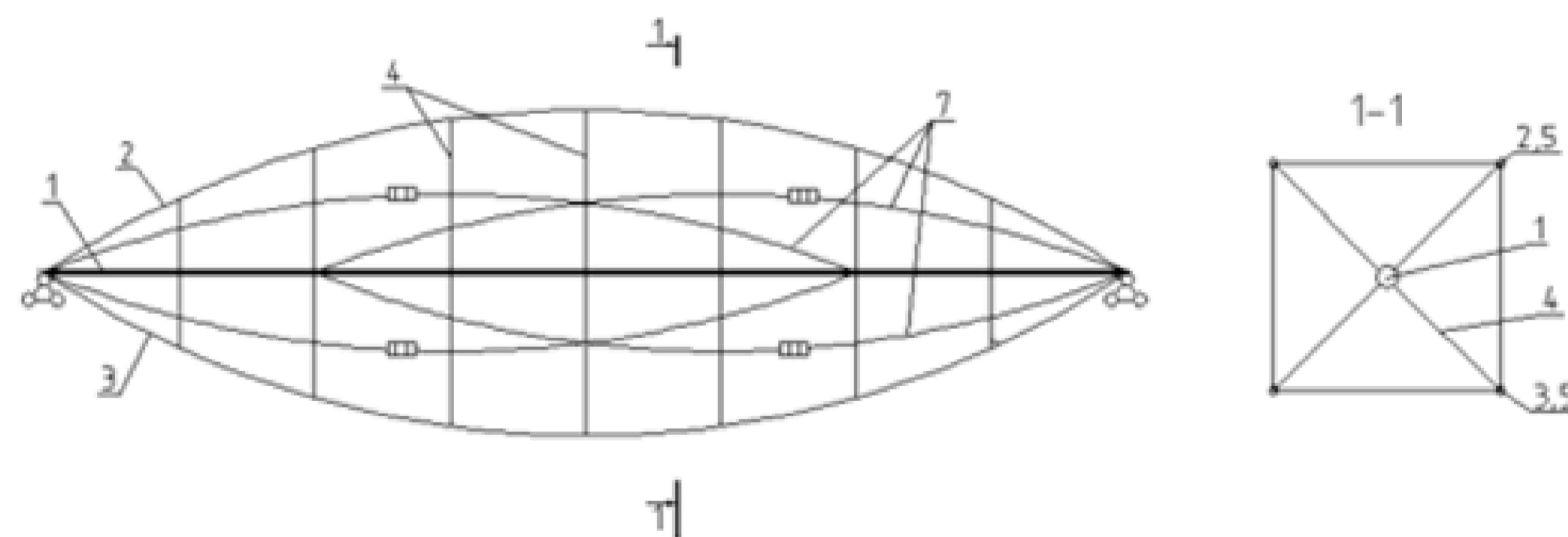
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ И РЕГУЛИРУЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ПРЕДНАПРЯЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ



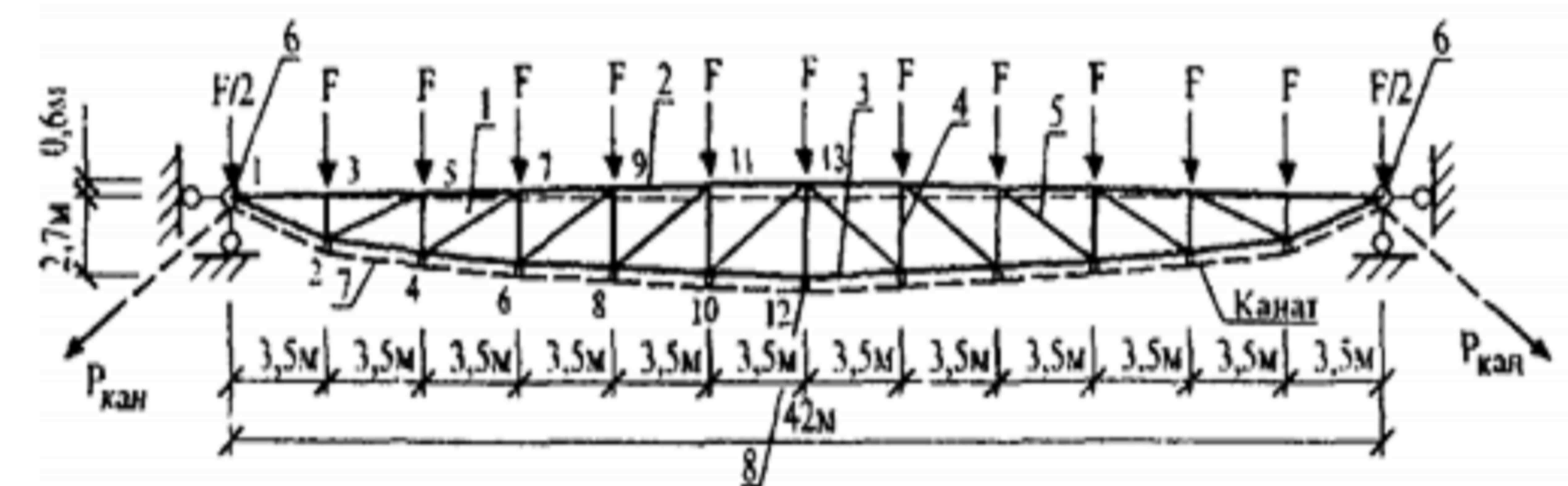
Двухпролетная ферма Г. Маньяля;
а) общий вид; б) схема



Усиление арок покрытия предварительно натянутыми струнами государственного универсального магазина в Москве (В. Г. Шухов)

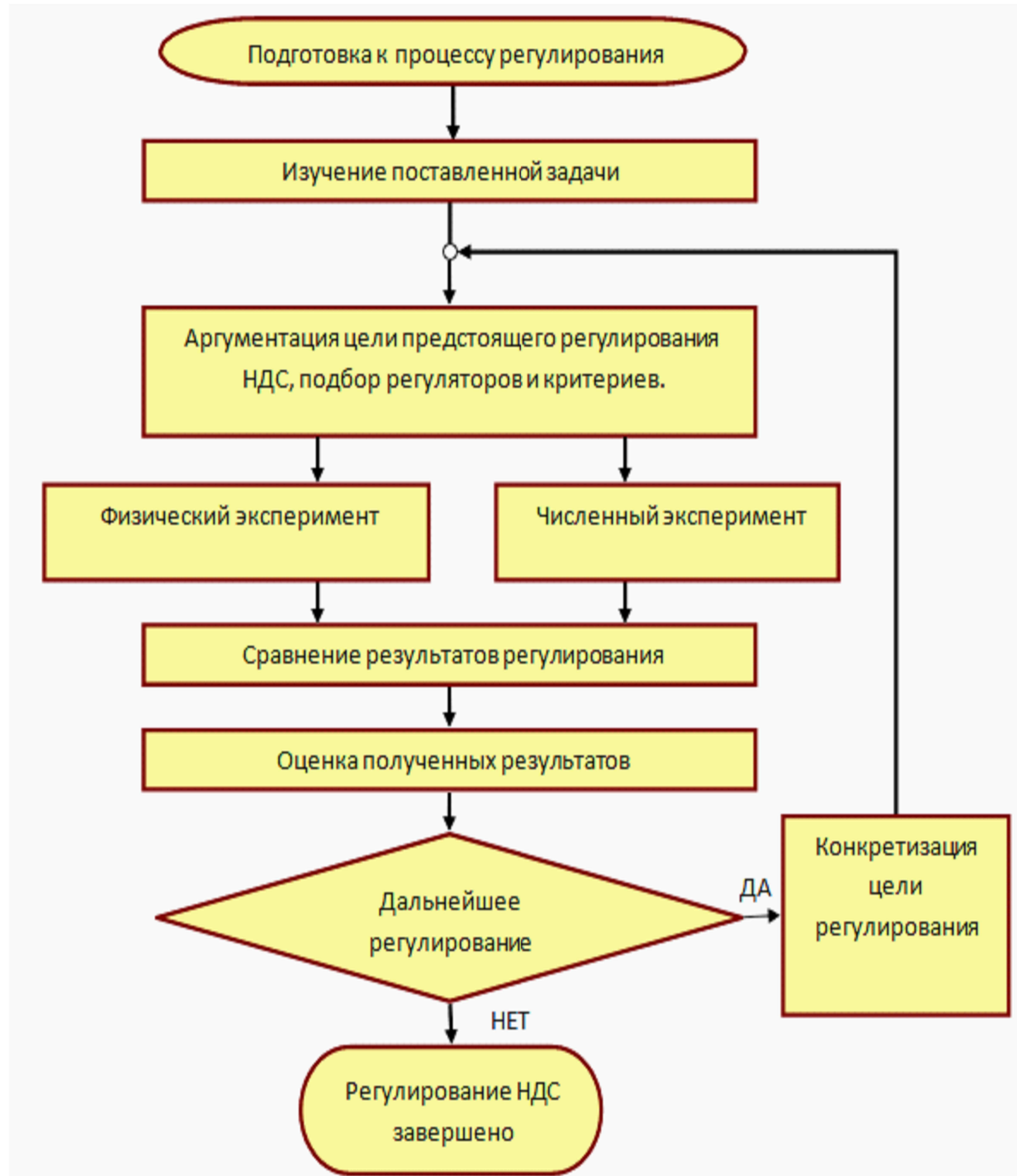


Преднапряженная шпренгельная ферма (В. В. Егоров)
1 – балка-распорка; 2,3 – верхние и нижние затяжки основного шпренгеля; 4 – шпренгель; 5 – направляющие; 6 – связевые элементы; 7 – затяжки дополнительных шпренгелей

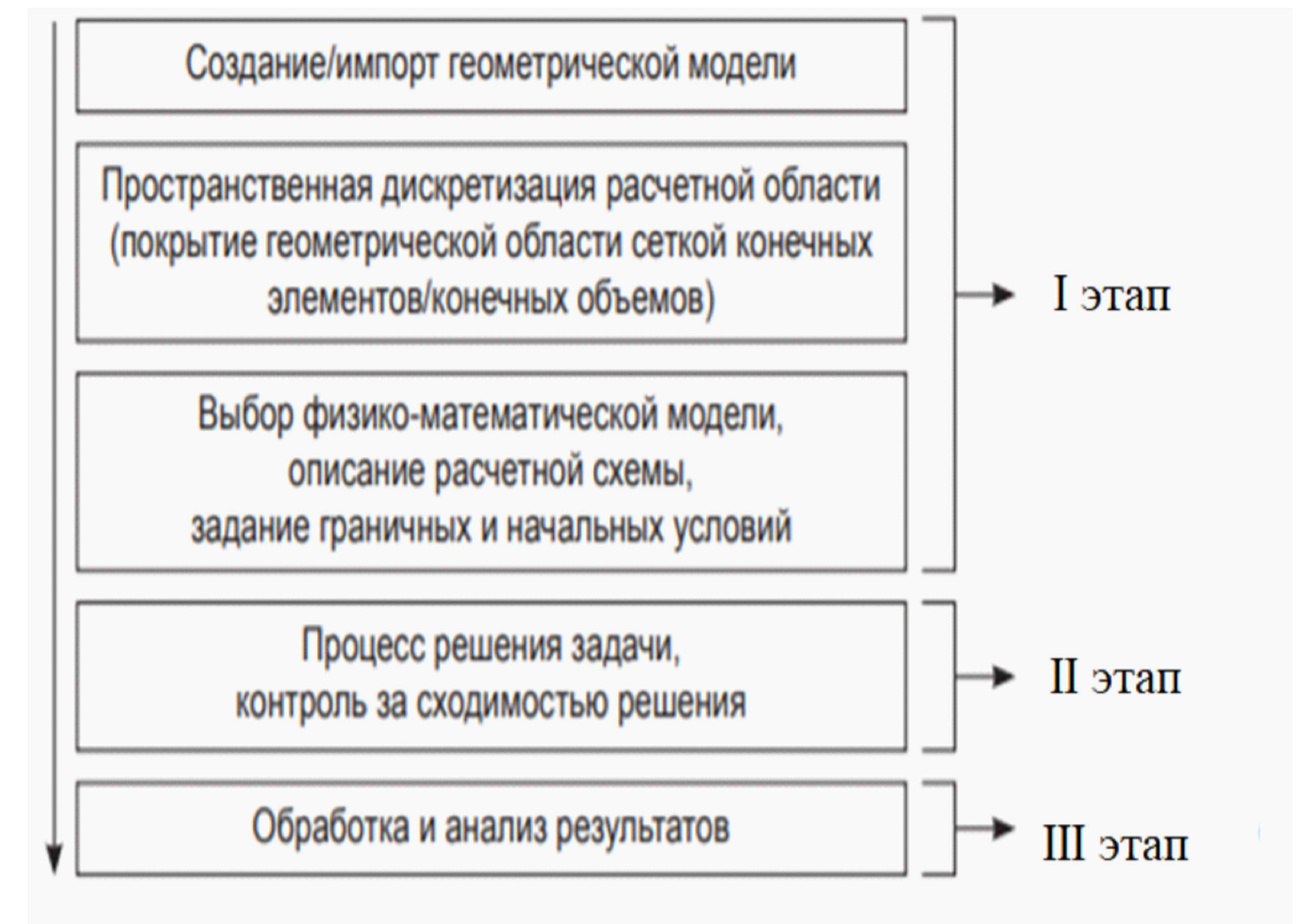


Преднапряженная вантово-стержневая система (Р.В. Алдушкин)
1 – балка жесткости; 2,3 – пояса, 4 – стойки; 5 – раскосы; 6 – узлы крепления системы; 7 – несущий трос; 8 – пролетные узлы

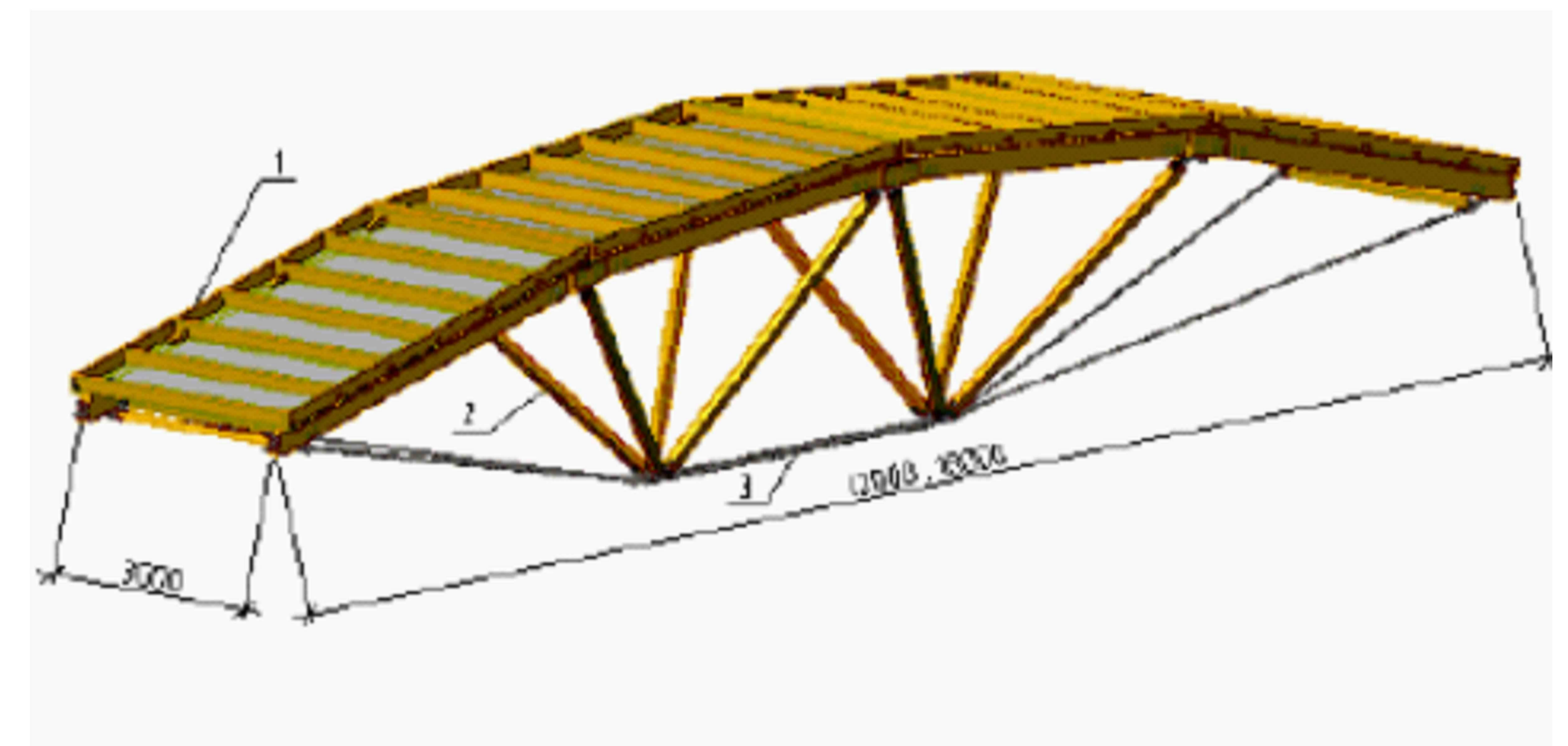
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РЕГУЛИРОВАНИЯ НДС КОНСТРУКЦИЙ



Алгоритм регулирования НДС конструкций

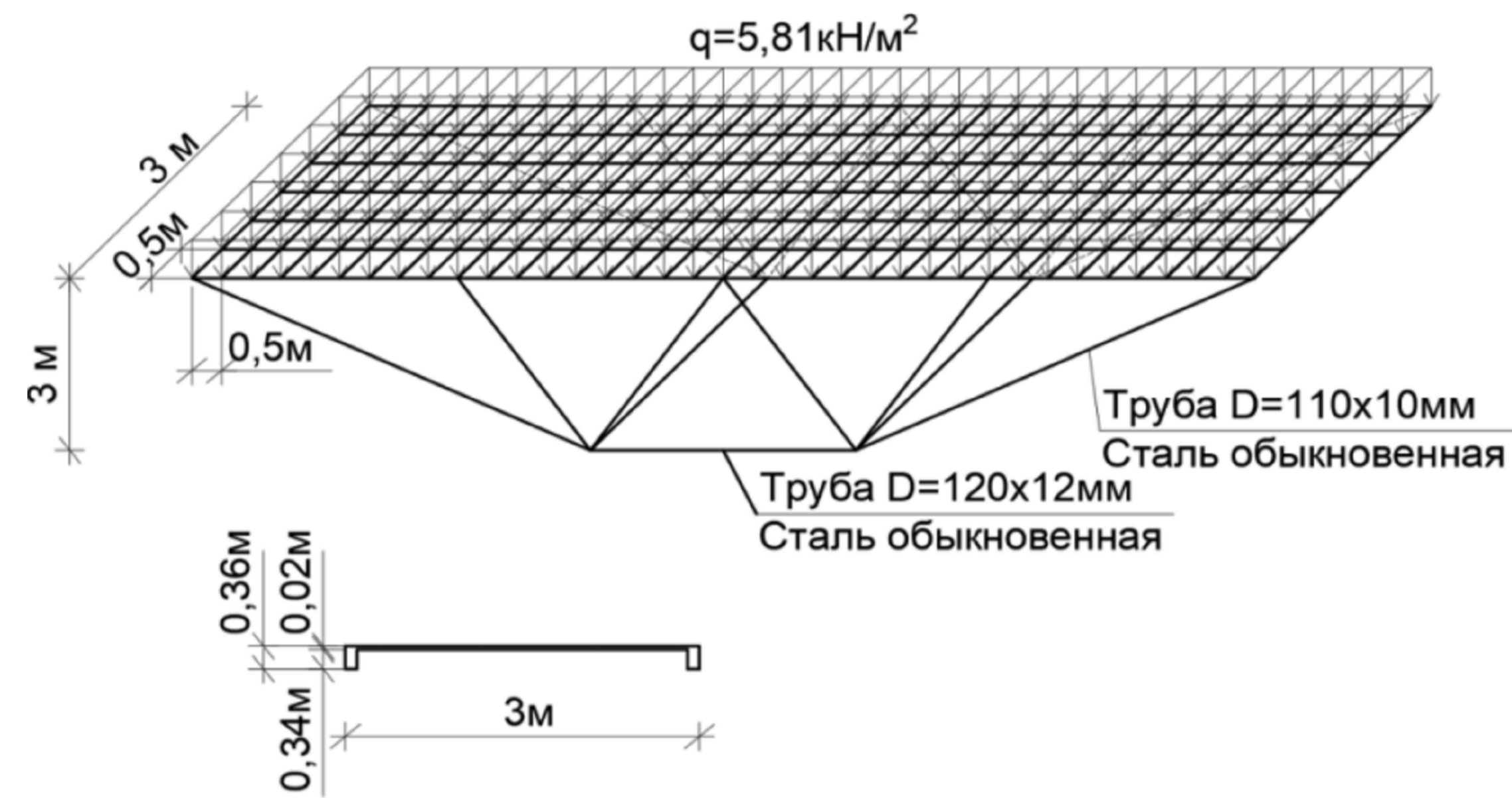


Этапы решения задачи в программном комплексе ANSYS

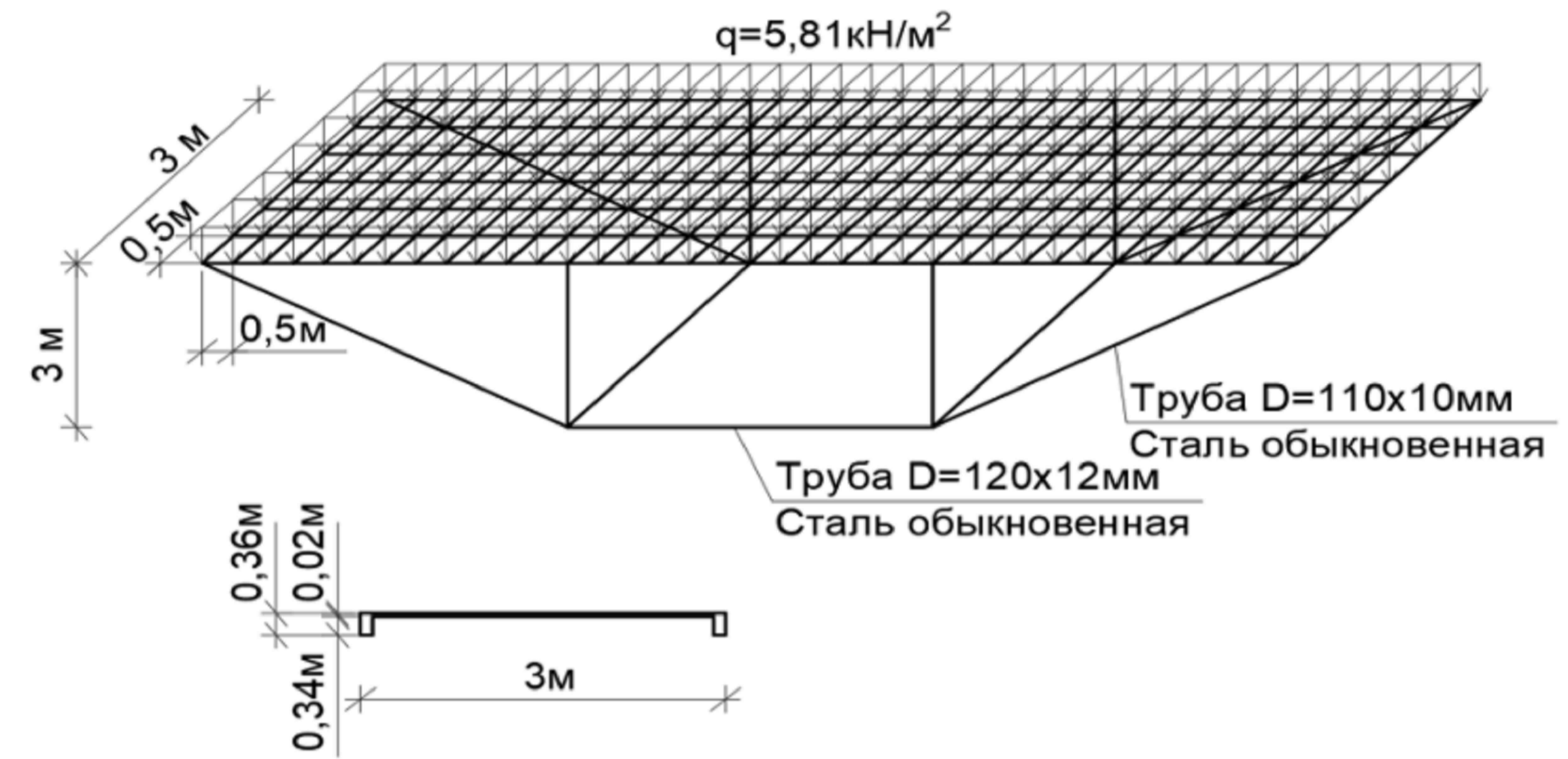


Деревометаллическая блок-ферма, ст. И.С. Инжутов, А.Ф. Рожков
1 – клефанерная плита 2 – раскос 3 – нижний металлический пояс

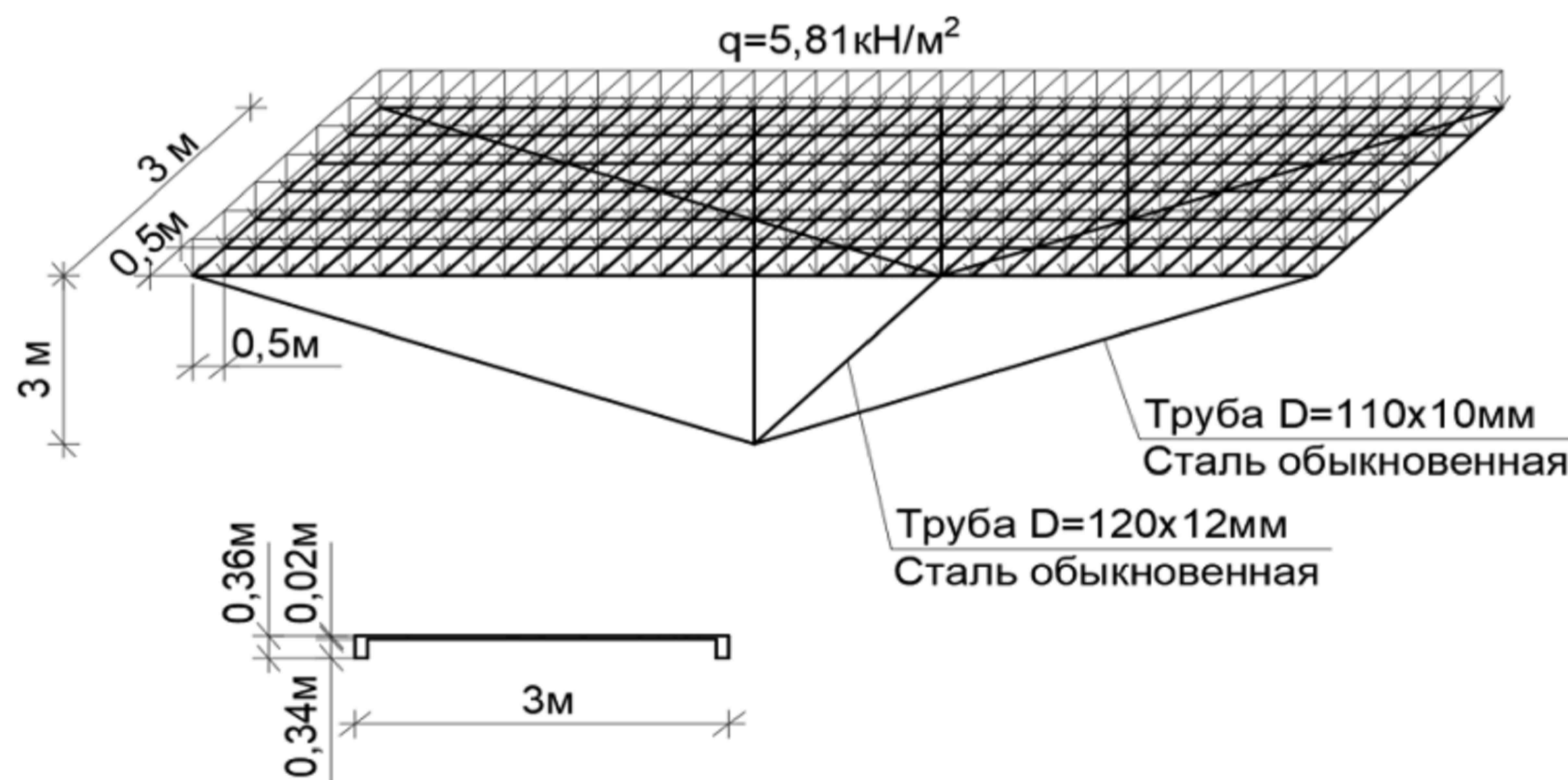
ГЛАВА 3. ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО ПОДКРЕПЛЕНИЯ ПЛИТЫ ШПРЕНГЕЛЕМ



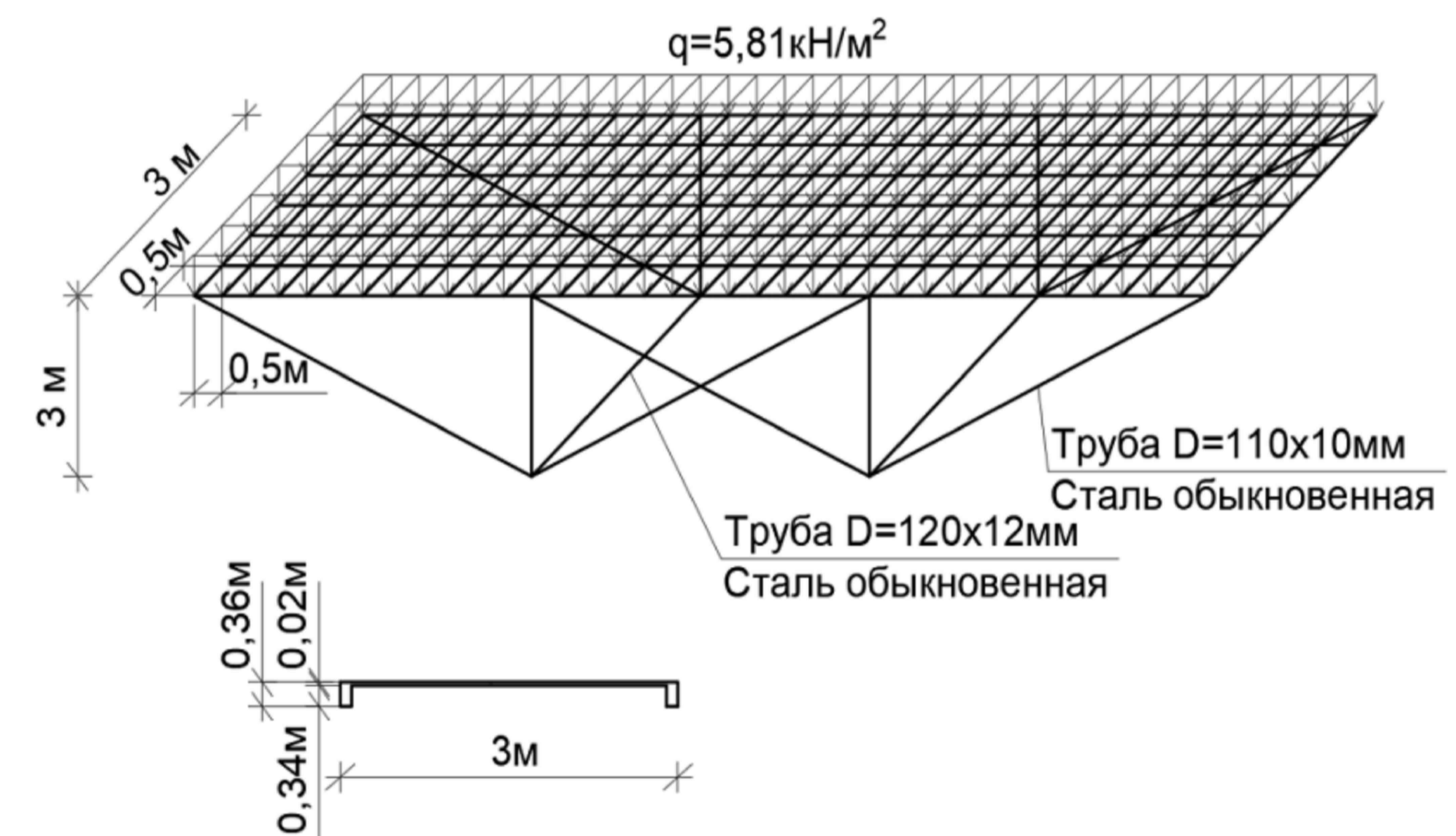
Расчетная схема для 1-го варианта подкрепления плиты



Расчетная схема для 2-го варианта подкрепления плиты



Расчетная схема для 3-го варианта подкрепления плиты



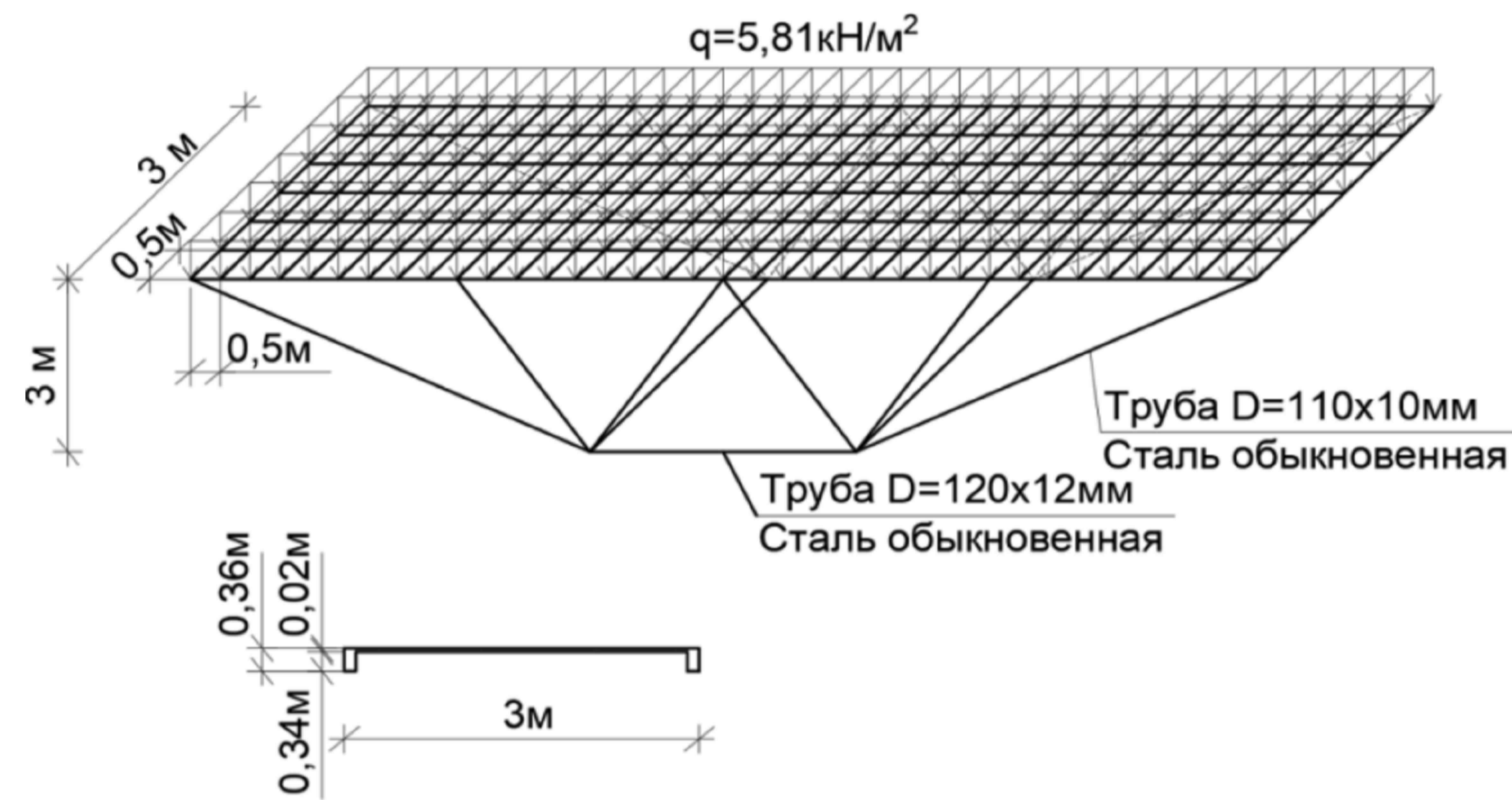
Расчетная схема для 4-го варианта подкрепления плиты

Результаты расчета плиты с различными вариантами шпренгеля

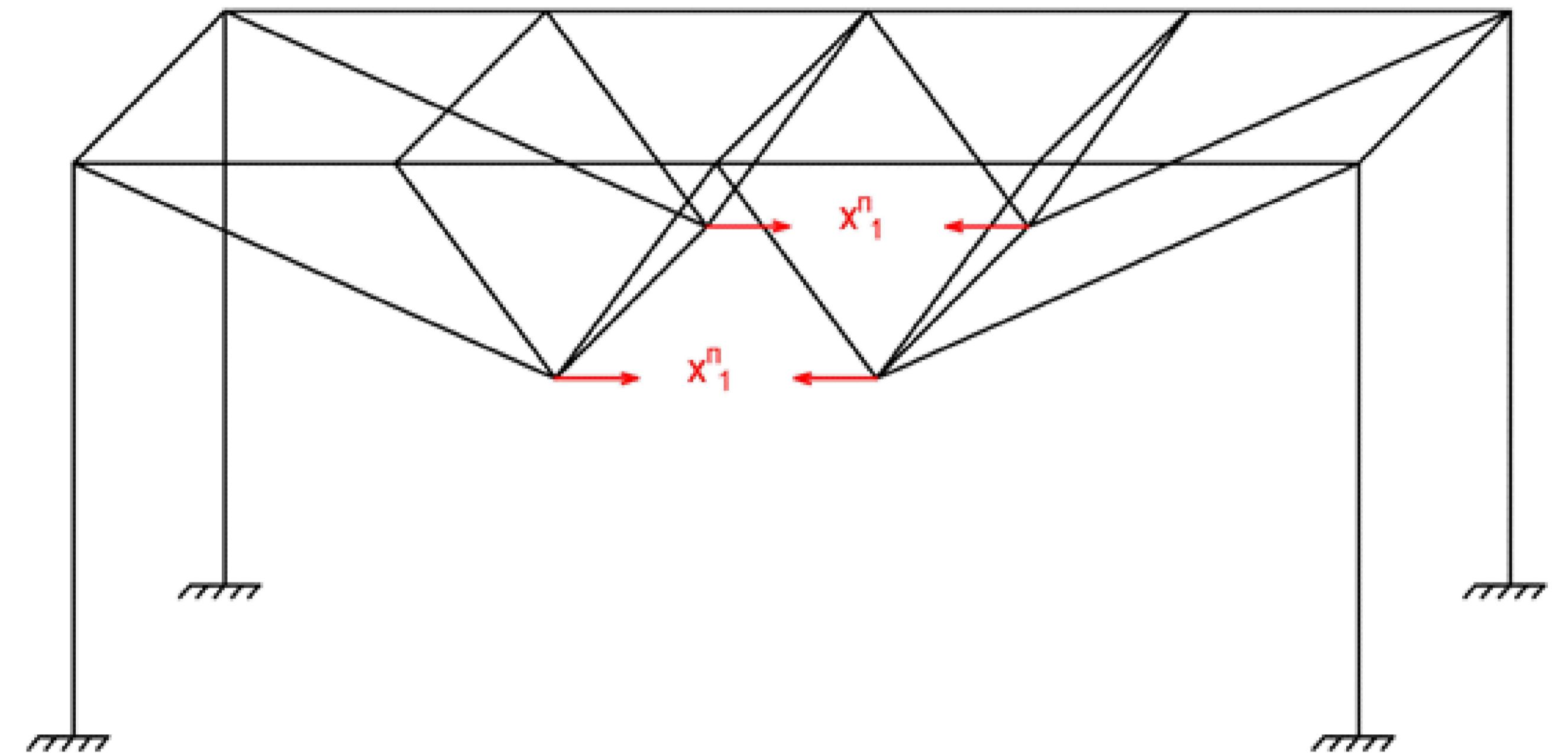
Наименование	Перемещения по оси z, мм	Изополя M_x , кНм/м	Эюра изгибающих моментов M_y , кН*м
шпренгельная плита с 1-ым вариантом подкрепления	40	2,31	330,67
шпренгельная плита со 2-ым вариантом подкрепления	50	2,29	390,86
шпренгельная плита с 3-им вариантом подкрепления	60	2,18	770,46
шпренгельная плита с 4-ым вариантом подкрепления	50	2,09	340,55

Вывод: на основе полученных результатов можно сделать вывод, что самым выгодным подкреплением является шпренгельная плита с 1-ым вариантом подкрепления. Шаг подкрепления более чаще.

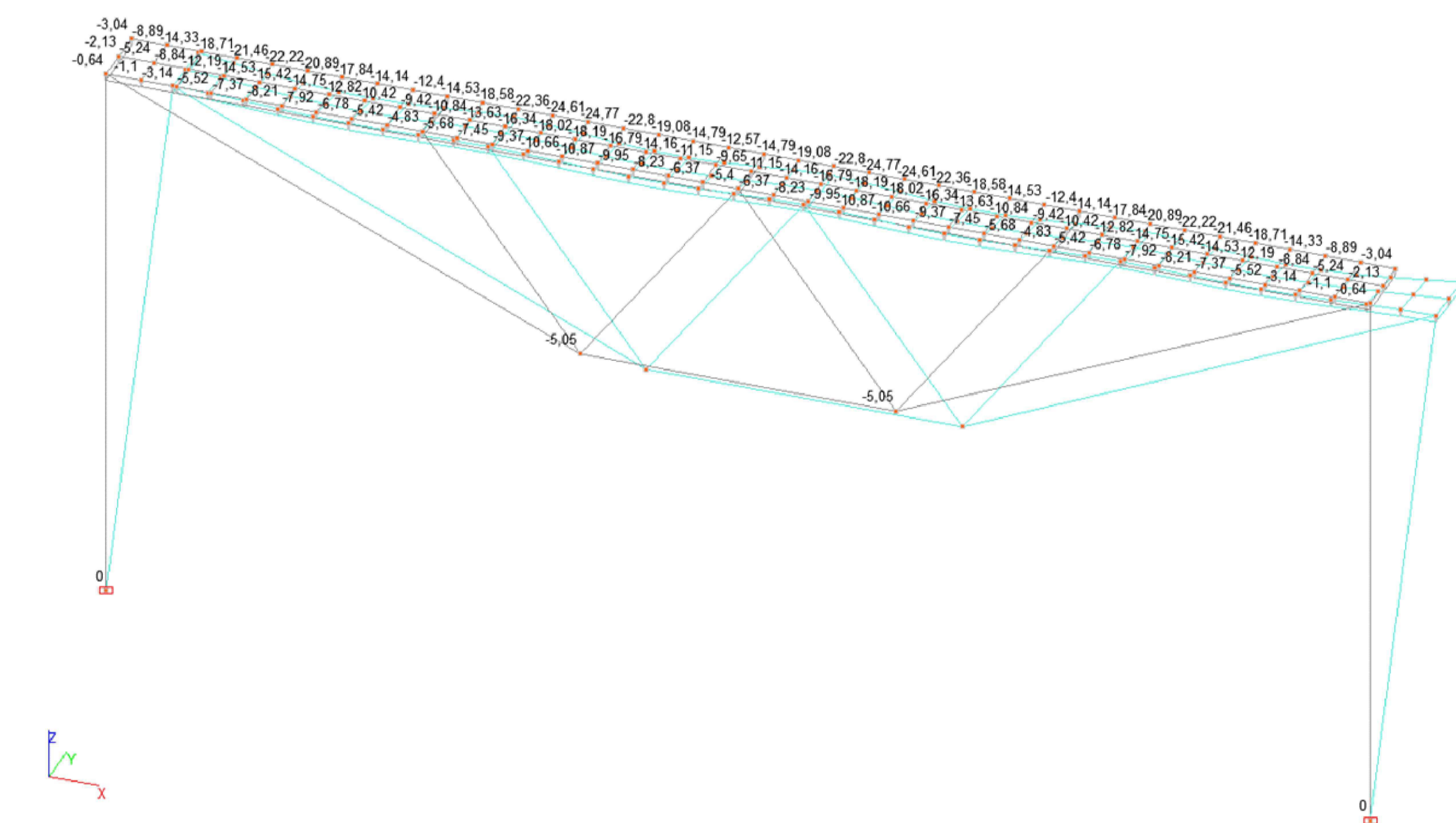
Результаты расчета регулирования НДС шпренгельной плиты при статических и динамических нагрузках



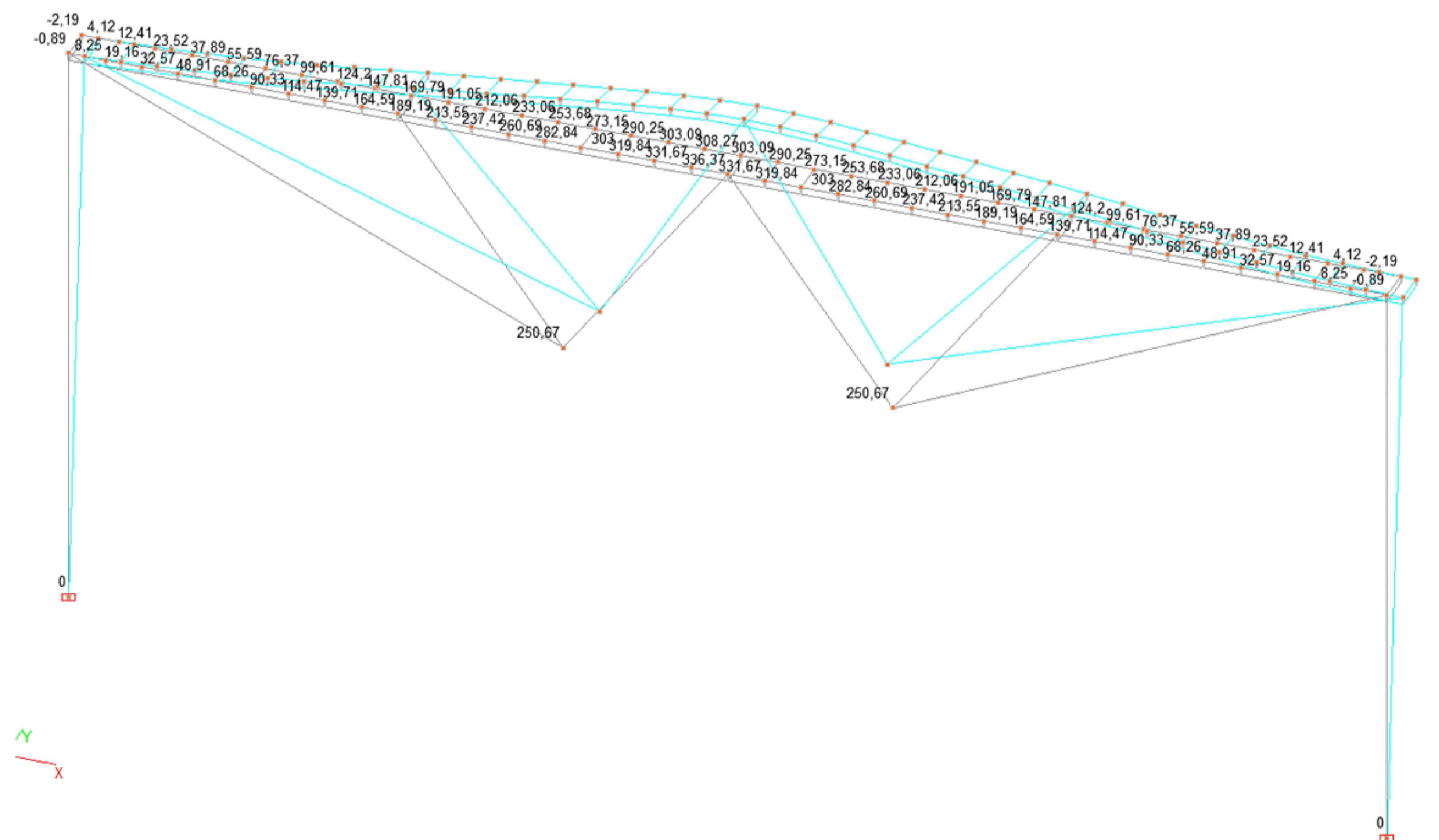
Расчетная схема с заданной нагрузкой, геометрическими и механическими характеристиками плиты и элементов шпренгеля



Расчетная схема в программном комплексе SCAD

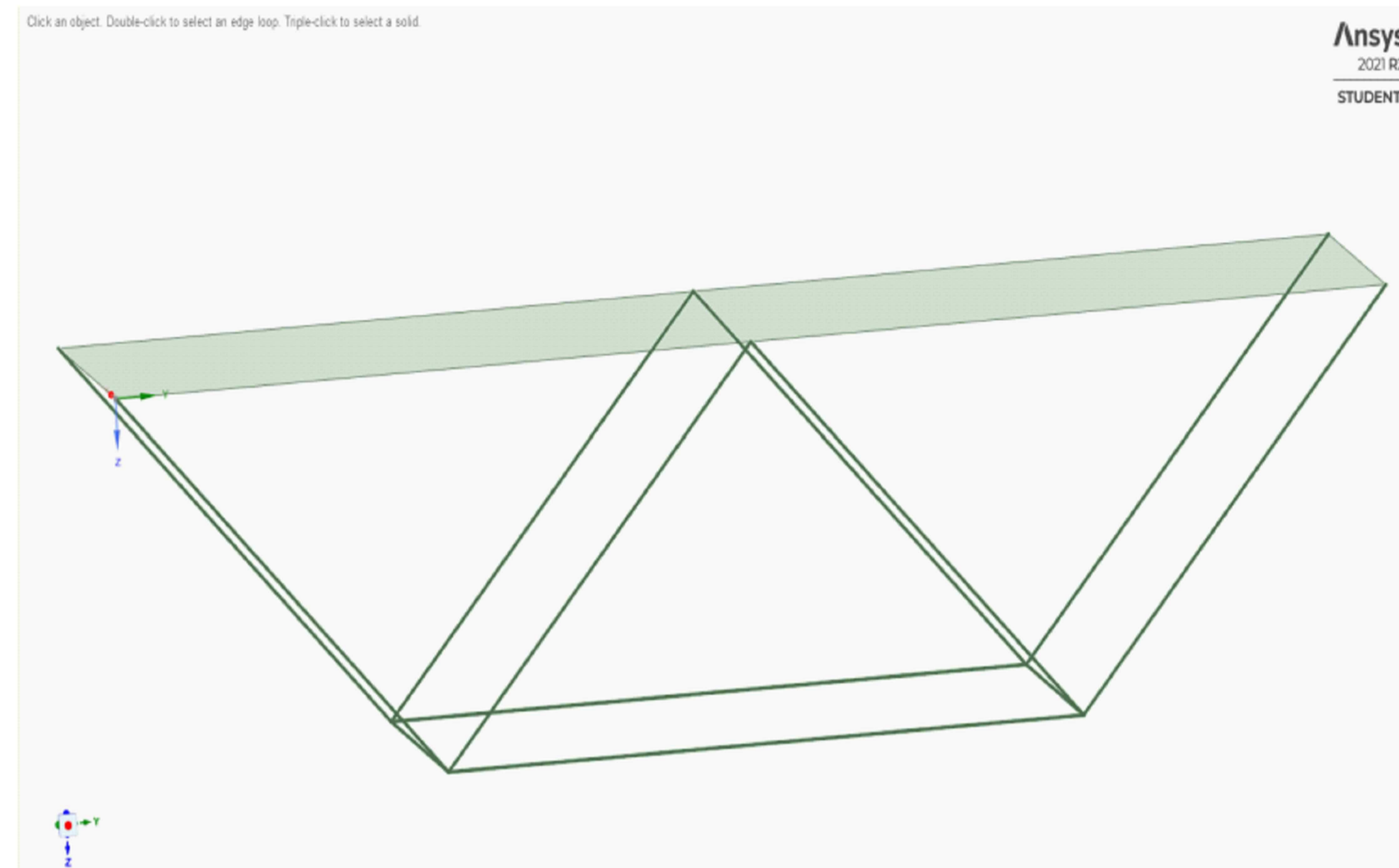


Перемещения исходной схемы $z, \text{мм}$
 Максимальное перемещение $z = -27,55 \text{ мм}$.
 Предельный прогиб для 18м, $f_U = l/240 = 75 \text{ мм}$.



Окончательное значение перемещения, $z_{ок} = -15,08 \text{ мм}$

Глава 4. Регулирование напряженно – деформированного состояния строительных конструкций на примере комбинированной блок-фермы покрытия с помощью программного комплекса ANSYS



Пространственная стержневая модель блок-фермы покрытия в программном комплексе ANSYS

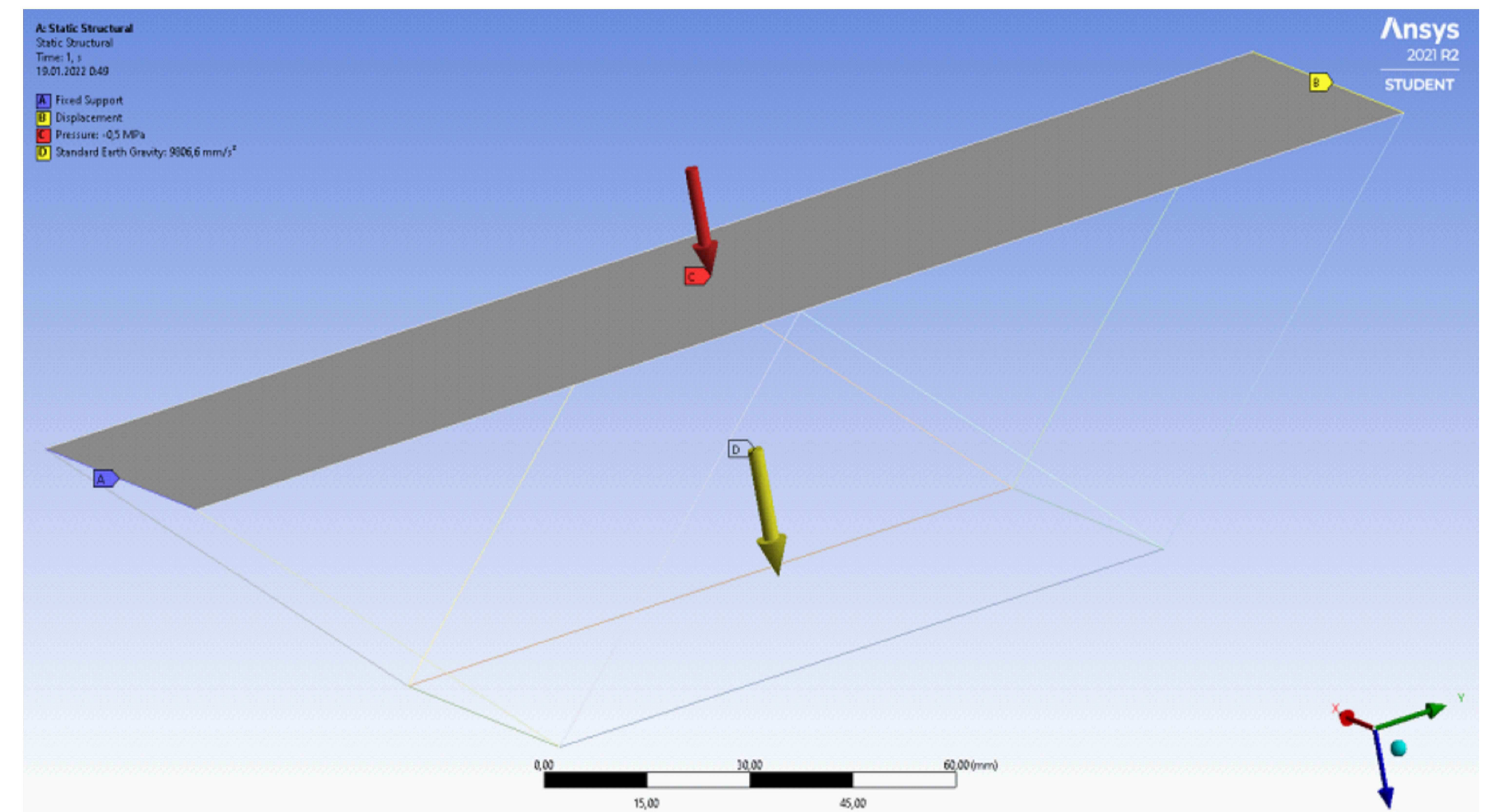
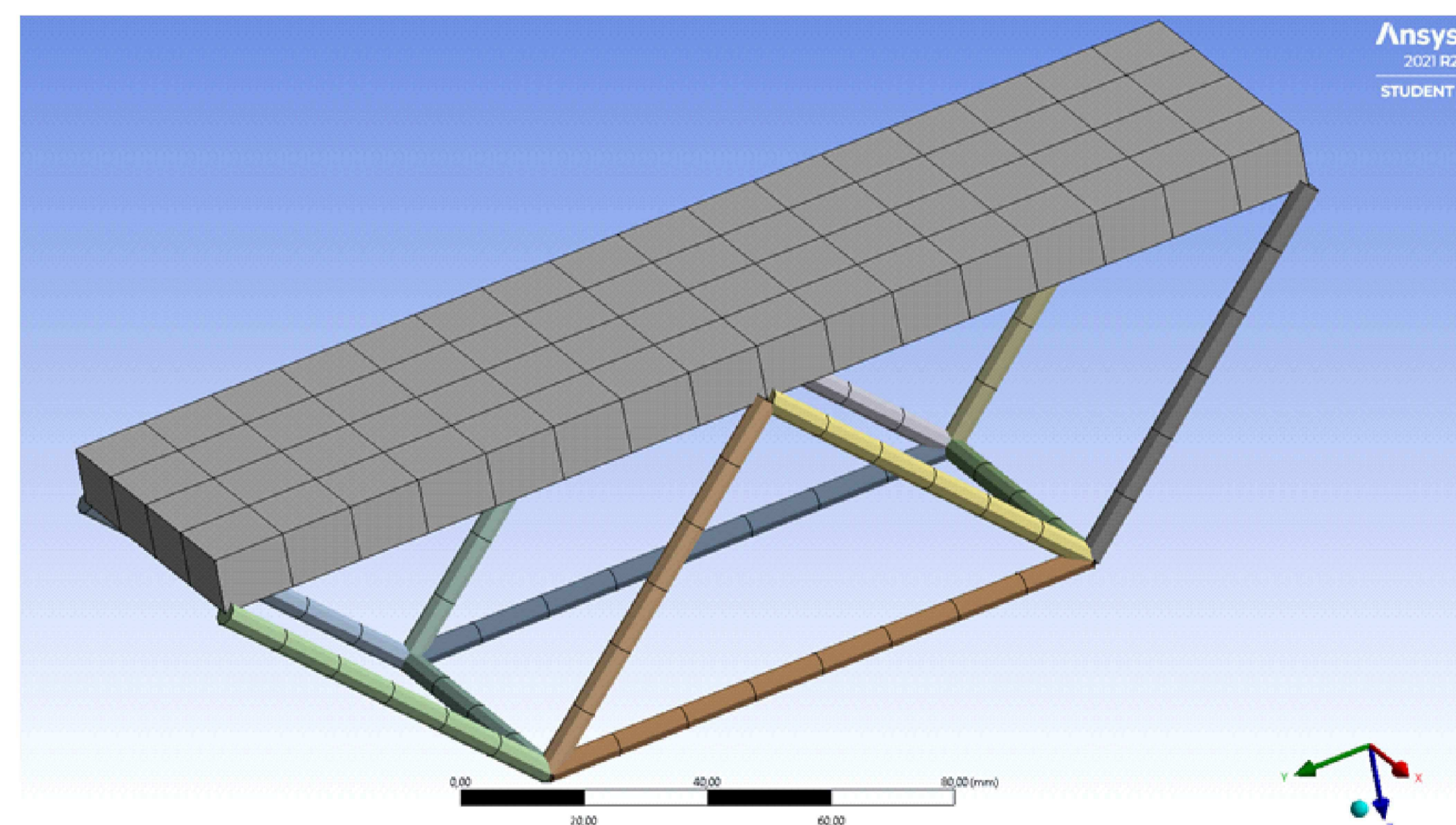
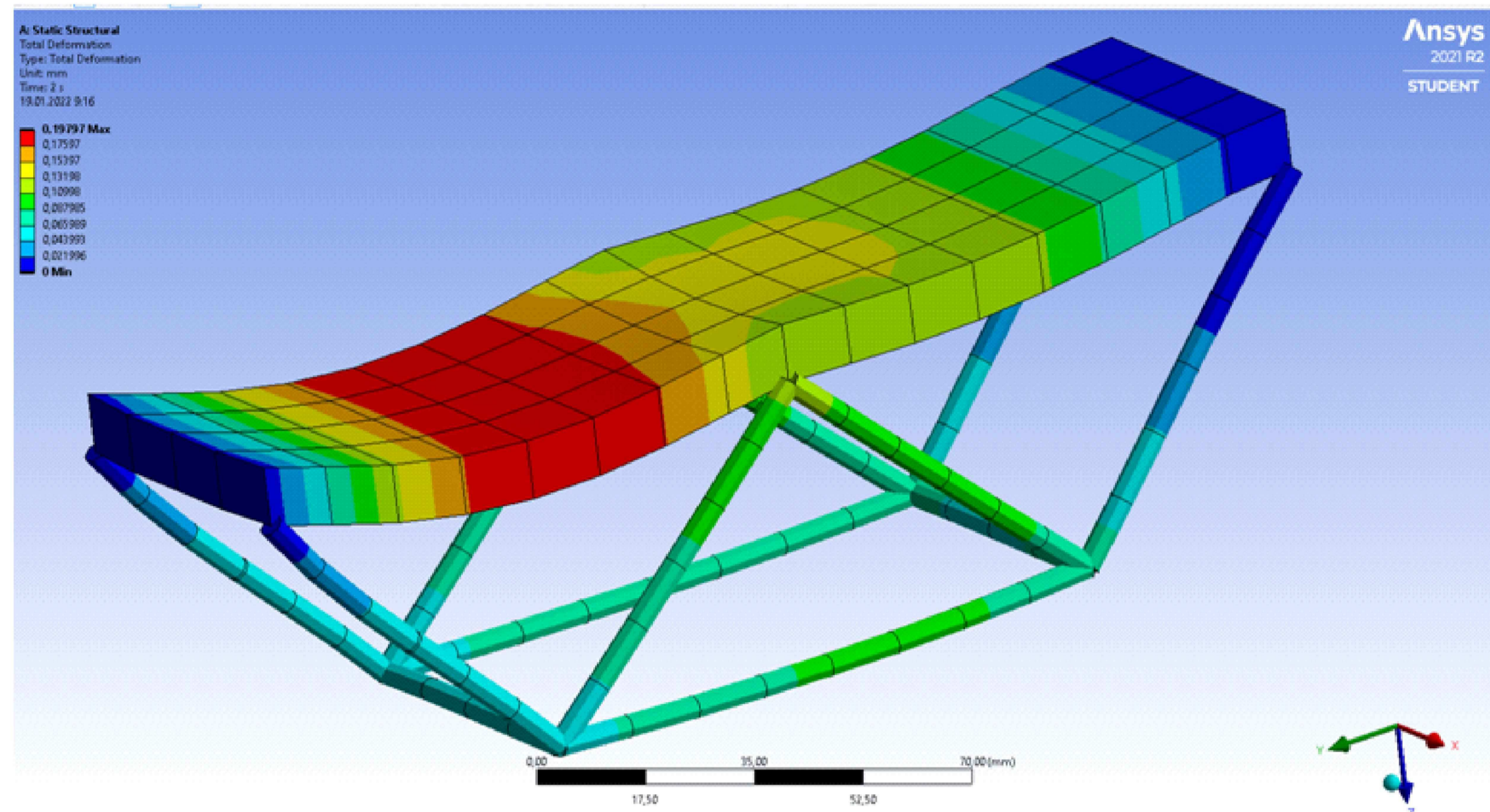


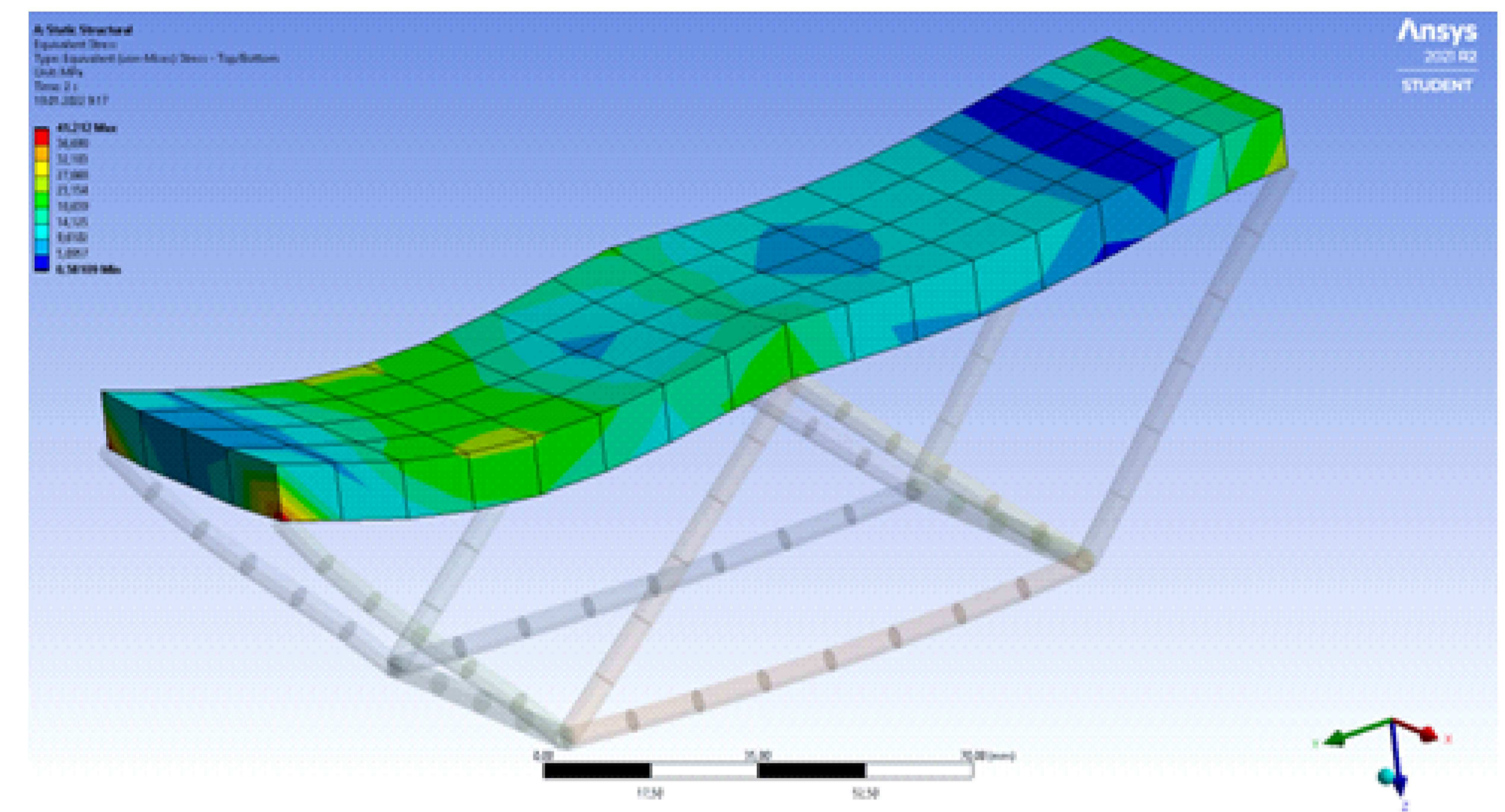
Схема загрузки модели блок-фермы покрытия на статические нагрузки в программном комплексе ANSYS



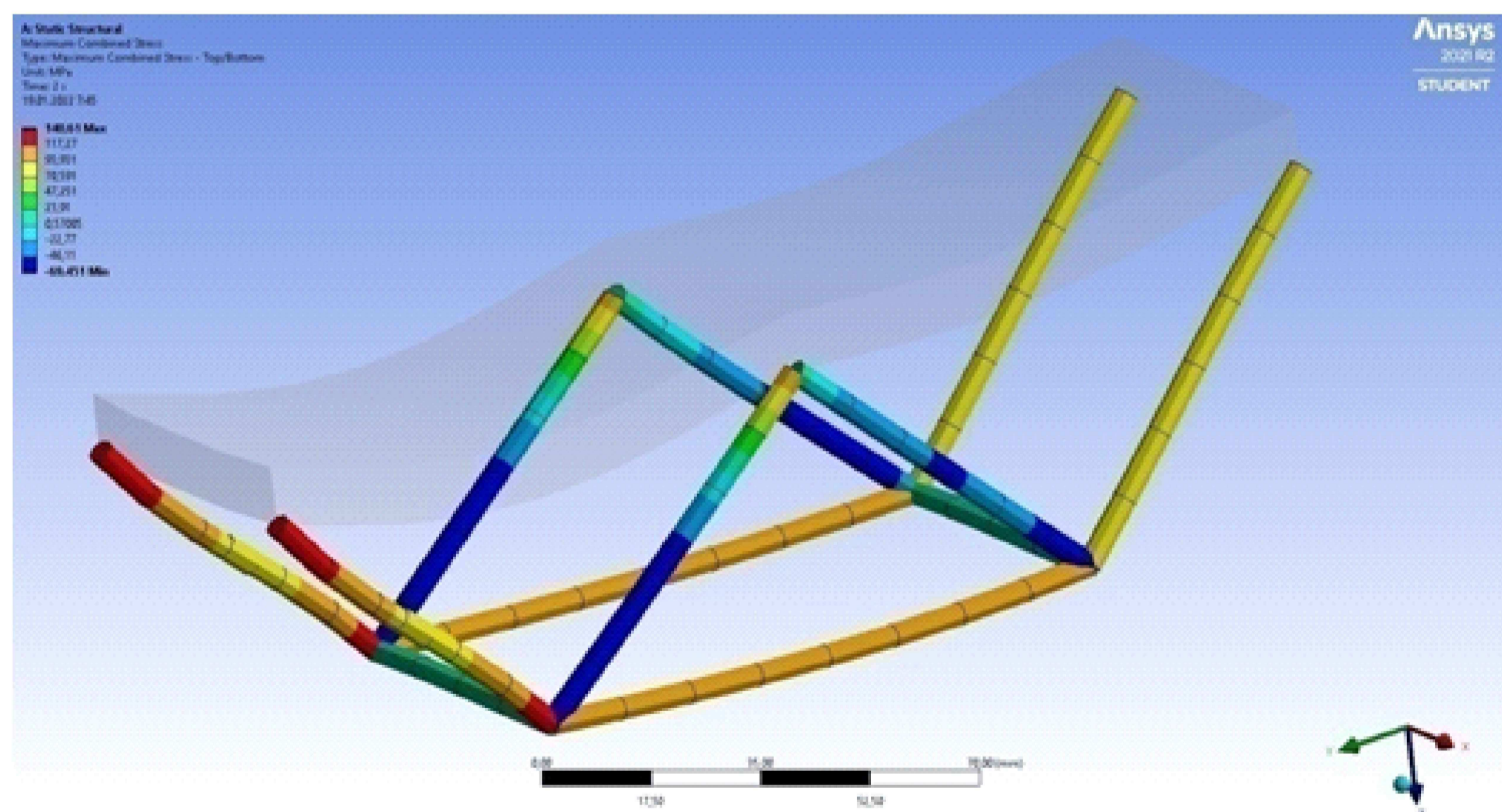
Сгенерированная сетка модели блок-фермы покрытия в программном комплексе ANSYS



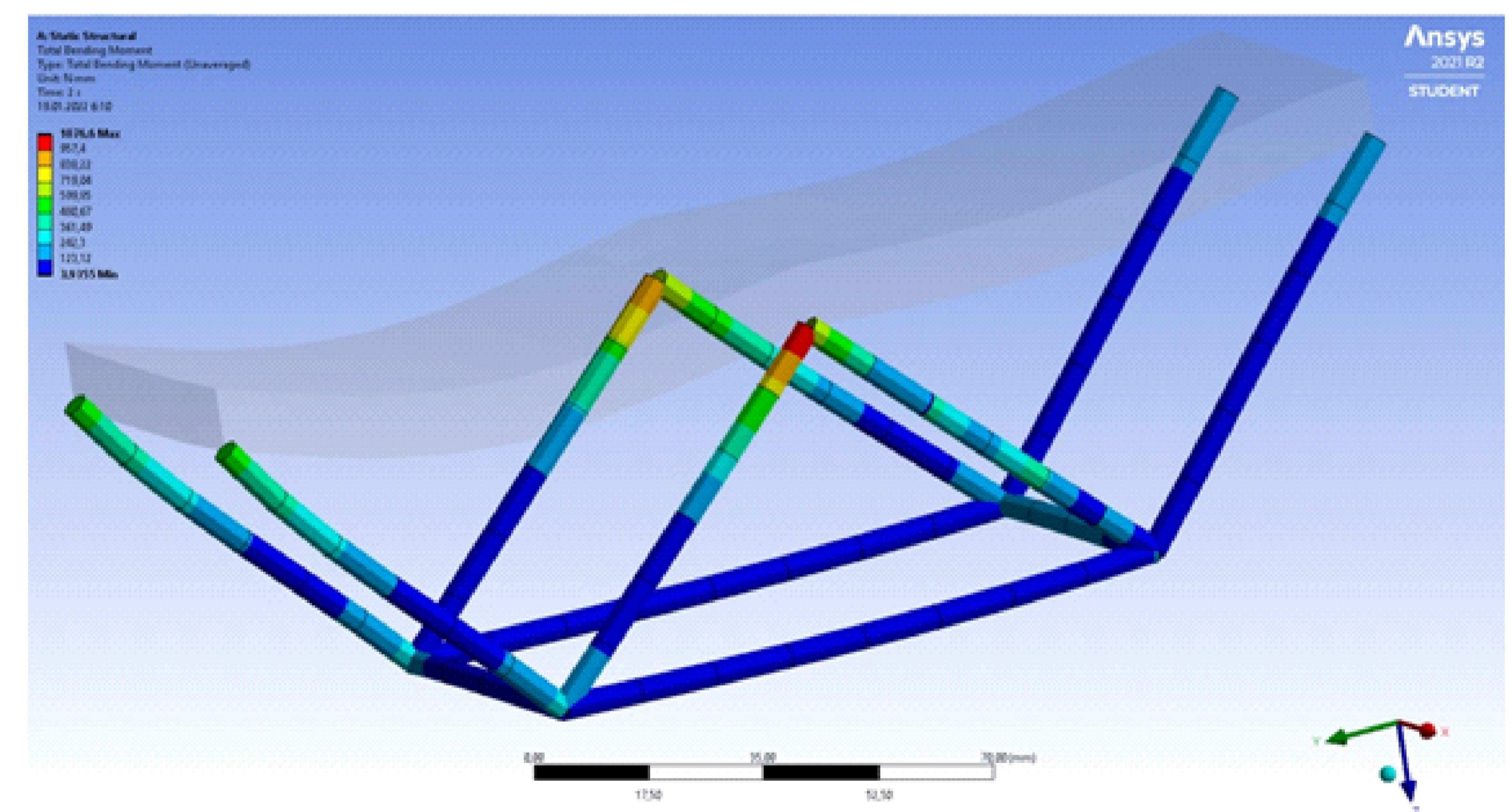
Общие перемещения при статическом расчете с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля
 Значение максимального перемещения 0,19 мм.



Напряжения в плите модели блок-фермы при статическом расчете с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля
 Максимальное значение напряжения 41,21 МПа.



Напряжения стальных элементов модели при статическом расчете с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля
 Максимальное значение напряжения 139,50 МПа.



Изгибающий момент при статическом расчете с предварительным напряжением наклонных элементов шпренгеля
 Максимальный изгибающий момент 1045,6 Н·мм.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

1. Оценка современного состояния способов регулирования НДС конструкций позволила выбрать преднапряжение элементов шпренгеля как наиболее эффективный способ регулирования НДС для блок-фермы покрытия.

2. Проведенный анализ различных вариантов шпренгелей позволил сделать вывод, что самым выгодным подкреплением является первый вариант. Полученные результаты расчетов на статические и динамические нагрузки в программном комплексе SCAD показывают, что путем предварительного напряжения двух симметричных элементов нижнего пояса шпренгеля удалось уменьшить прогиб в расчетной точке на 45% .

3. Создана пространственная конечно-элементная модель комбинированной блок-фермы покрытия, а также выполнен статический расчет стержневой модели в программном комплексе ANSYS. Удалось уменьшить перемещения плиты блок-фермы покрытия приблизительно на 30 % , и немного уменьшить значение максимального изгибающего момента на 3%.

4. Проанализировав результаты численных исследований, способов подкрепления плиты шпренгелем, можно сделать вывод о том, что алгоритм регулирования является мощным средством повышения эффективности строительных конструкций.

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

Инженерно-строительный институт
институт

Кафедра строительных конструкций и управляемых систем
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
С. В. Деордиев

подпись инициалы, фамилия

« 21 »
Июня 2022г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Регулирование НДС строительных конструкций при статических и
динамических нагрузках
тема

08.04.01 «Строительство»
код и наименование направления

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

Научный руководитель	<u>Палагускин</u> - 21.06.22 подпись, дата доцент, к. т. н.	<u>В. И. Палагускин</u> инициалы, фамилия
Магистрант	<u>Поляков</u> 21.06.22 подпись, дата	<u>Е. В. Поляков</u> инициалы, фамилия
Рецензент	<u>Сабиров</u> 21.06.22 подпись, дата доцент, к. т. н.	<u>Р. А. Сабиров</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2022