

Министерство образования и науки Донецкой Народной Республики

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

На правах рукописи

Мушанов Александр Владимирович

УДК 624.074.5

**ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ РАБОТА И ФОРМООБРАЗОВАНИЕ  
СТЕРЖНЕВЫХ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА  
НЕТИПОВОМ ПЛАНЕ**

05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание научной степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель

Горохов Евгений Васильевич

доктор технических наук, профессор

Идентичность всех экземпляров диссертации заверяю:

ученый секретарь

специализированного ученого совета Д 01.006.02



Лахтарина С.В.

Макеевка – 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

| Наименование раздела (подразделов)   | Стр. |
|--|------|
| ВВЕДЕНИЕ   | 5    |
| РАЗДЕЛ I АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ, МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ                                   | 12   |
| 1.1 Анализ существующих конструктивных схем.   | 12   |
| 1.2 Анализ методов расчета и проектирования.   | 18   |
| 1.2.1 Аналитические методы расчета.  | 18   |
| 1.2.2 Численные методы расчета.  | 21   |
| 1.3 Общее понятие потери устойчивости и анализ норм проектирования.  | 23   |
| 1.4 Анализ проведенных экспериментальных исследований структурных конструкций.   | 30   |
| 1.5 Анализ подходов к оптимизации конструктивных форм структурных покрытий.  | 32   |
| 1.6 Цели и задачи исследования.  | 38   |
| РАЗДЕЛ II ОБОСНОВАНИЕ ПЛАНИРУЕМЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ   | 41   |
| 2.1 Обоснование использования метода конечных элементов в решении задач устойчивости и общего анализа напряжённо-деформированного состояния. | 41   |
| 2.1.1 Теоретическая основа возможности решения задачи устойчивости методом конечных элементов.   | 45   |
| 2.1.2 Обоснование расчетной схемы исследования устойчивости стержня методом конечных элементов.  | 48   |
| 2.2 План и методика проведения физического эксперимента по устойчивости центрально-сжатых стержней.  | 51   |

|            |     |   |    |
|------------|-----|---|----|
|            | 2.3 | Обоснование используемого метода оптимизации геометрической формы структурного покрытия.  | 53 |
|            | 2.4 | Выводы по результатам II-го раздела.  | 56 |
| РАЗДЕЛ III |     | ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ   | 58 |
|            | 3.1 | Исходные данные и методика моделирования при исследовании устойчивости центрально-сжатых стержней.  | 58 |
|            | 3.2 | Анализ результатов численных исследований.  | 63 |
|            | 3.3 | Создание регрессионных моделей по значениям критических напряжений и создание зависимостей «напряжения-гибкость».                                   | 65 |
|            | 3.4 | Определение коэффициента приведения к расчетной длине и коэффициента продольного изгиба.  | 69 |
|            | 3.5 | Выводы по результатам III-го раздела  | 71 |
| РАЗДЕЛ IV  |     | ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ УЗЛОВОГО СОЕДИНЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ | 74 |
|            | 4.1 | Цели и задачи экспериментальных исследований потери устойчивости центрально-сжатых стержней   | 74 |
|            | 4.2 | Общая схема испытательных установок   | 74 |
|            | 4.3 | Методика проведения экспериментальных исследований  | 84 |
|            | 4.4 | Обработка результатов испытаний   | 85 |
|            | 4.5 | Выводы по результатам IV-го раздела   | 88 |
| РАЗДЕЛ V   |     | ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ НА НЕТИПОВОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ   | 90 |
|            | 5.1 | Обоснование системы управляющих и варьируемых   | 90 |

|            |  |
|------------|--|
| параметров |  |
| 5.2        | Формулировка функции цели 90   |
| 5.3        | Оценка влияния основных параметров проектирования на оптимизацию проектных решений 95  |
| 5.3.1      | Результаты оптимизации исходных решений по одному параметру 95   |
| 5.3.2      | Результаты оптимизации исходных решений по двум параметрам 98  |
| 5.3.3      | Регрессионный анализ результатов вычислений по одному параметру и двум параметрам 100  |
| 5.4        | Влияние податливости опор на оптимальные геометрические параметры структурных покрытий на прямоугольном нетиповом плане 101                  |
| 5.4.1      | Характеристика податливости опор и ее значимость 101   |
| 5.4.2      | Предварительные выводы о влиянии коэффициента $k$ 103  |
| 5.4.3      | Результаты численного эксперимента 104   |
| 5.4.4      | Результаты регрессионного анализа 108  |
| 5.4.5      | Выводы по результатам V-го раздела 109   |
|            | ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ 111  |
|            | СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 114   |
|            | ПРИЛОЖЕНИЕ А (графики процесса потери устойчивости центрально-сжатых стержней в упругой и упруго-пластических стадиях) 129                   |
|            | ПРИЛОЖЕНИЕ Б (зависимости варьируемых параметров покрытия при решении оптимизационной задачи на неподвижном и податливом контурах) 140       |
|            | ПРИЛОЖЕНИЕ В (рекомендации по проектированию структурных конструкций с шаровыми узловыми вставками-коннекторами на высокопрочных болтах) 169 |
|            | ПРИЛОЖЕНИЕ Г (акты внедрения) 183  |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Проектирование структурных конструкций представляет серьезный научный и практический интерес, что подтверждается их многократным использованием во всех сферах строительной отрасли. Структурные покрытия в большинстве случаев рассчитываются в различных программных комплексах для расчета и проектирования строительных конструкций, расчетная схема которых представлена как многократно статически-неопределимая шарнирно-стержневая система, в которой результирующим усилием при подборе сечения является продольное усилие, возникающие в отдельно взятом стержне.

Опытные данные различных исследователей при проектировании таких конструкций указывают на возможность значительного уточнения несущей способности их центрально-сжатых стержней, и в представленной работе такие данные явились одной из составляющих предлагаемого соискателем общего подхода по повышению эффективности применения структурных покрытий. Учитывая тенденцию увеличения пролетов, перекрываемых структурными покрытиями, в сравнении с ранее разработанными оптимальными типовыми решениями (24x24 м...42x42 м), предполагается поиск оптимальной конструктивной формы для нетиповых большепролетных покрытий на прямоугольном плане размером до 126 метров и соотношением сторон 1/2.8. Сочетание этих двух подходов в одном алгоритме проектирования позволит значительно улучшить технико-экономические показатели проектируемых покрытий в сравнении общепринятыми принципами проектирования при использовании для этих целей типового сортамента структурного покрытия.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Диссертационная работа выполнена в рамках двух кафедральных научно-исследовательских работ:

1. К-2-07-16 «Усовершенствование аналитических и численных методов расчета строительных конструкций, их элементов и соединений на действие статических и динамических нагрузок с учетом воздействия факторов износа и физически нелинейной работы материала (№ гос. рег. 0117D000262 от 02.05.2017).

2. К-2-08-16 «Современные подходы к формообразованию и обеспечению надежности строительных металлоконструкций на основе использования новых информационных технологий в процессе проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации» (№ гос. рег. 0117D000263 от 02.05.2017).

**Степень разработанности темы исследования.** Опытные данные Л. Эйлера, Ф. Энгессера, Ф.С. Ясинского, Б.Г. Галеркина, И.Г. Бубнова, Н.С. Стрелецкого, А.Р. Ржаницына, С.П. Тимошенко, Дж. Герэ, А.В. Перельмутера и В.И. Сливкера в аналитических, экспериментальных и численных исследованиях позволили установить влияние фактического моделирования стержней и узловых соединений покрытия на несущую способность центрально-сжатых стержней из условия устойчивости, что фактически для такого типа узловых соединений структурных покрытий не исследовалось. В области исследования оптимального проектирования труды Я.М. Лихтарникова, В.Н. Шимановского, В.Н. Гордеева, М.Л. Гринберга, И.В. Роменского основаны на вариантном проектировании, использовании нелинейного проектирования в области оптимизации покрытий на нетиповом плане по действующим нормам проектирования с различными варьируемыми параметрами. Однако, оптимизация покрытий с нетиповым (нестандартным) соотношением сторон прямоугольника в плане и с учетом фактического моделирования элементов покрытия не затрагивалась. В рамках оценки НДС структурных покрытий работы исследователей ЦНИИСК им. Кучеренко, В.К. Файбишенко, В.И. Трофимова, Г.Б. Бегуна, Л.Н. Лубо, А.М. Югова выполнялись при условии использования типового сортамента структурных конструкций. Однако, при увеличении пролетов применение типового сортамента ограничивается либо не используется.

**Целью исследования является** разработка оптимальных конструктивных форм структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах с учетом значимых параметров проектирования и уточненной несущей способностью центрально-сжатых стержней, обеспечивающих возможность использования типовых конструктивных элементов.

На основе выполненного критического анализа конструктивных решений, методов расчета и оптимального проектирования структурных покрытий поставлены следующие **задачи исследования:**

1. Обосновать основные теоретические и экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния, устойчивости центрально-сжатых стержней и оптимального проектирования структурных покрытий.

2. Выполнить теоретическую и экспериментальную оценку влияния конструктивного решения узловых соединений на устойчивость центрально сжатых стержней структурных покрытий.

3. Разработать алгоритм оптимального проектирования структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах с учетом уточненной оценки несущей способности центрально-сжатых стержней и расширенных подходов к формообразованию в виде пологих стержневых оболочек положительной гауссовой кривизны.

4. Оценить влияние податливости опор на напряженно-деформированное состояние конструкции структурного покрытия на нетиповом плане.

5. Разработать рекомендации по проектированию покрытий на большепролетных нетиповых прямоугольных планах, обеспечивающие возможность использования типовых конструктивных элементов (стержней, соединительных элементов) при перекрытии прямоугольных планов с нетиповым соотношением сторон.

**Объект исследования** – напряженно-деформированное состояние элементов и конструктивная форма структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах.

**Предмет исследования** – общие закономерности изменения напряженно-деформированного состояния элементов и конструктивной формы структурных покрытий на нетиповых планах в зависимости от изменения значимых факторов (основных параметров проектирования).

**Научную новизну полученных результатов** составляют:

– уточненные значения критической силы для центрально-сжатых стержней структурного покрытия при анализе потери устойчивости в упругой и упруго-пластической стадиях работы материала, вычисленные с учетом влияния конструктивного решения узловых соединений;

– уточненные значения коэффициента приведения геометрической длины стержня к расчетной ( $\mu$ ), и коэффициента продольного изгиба  $\varphi$  (для стали  $R_y = 240$  МПа), учитывающих гибкость и степень заземления стержня в узловых соединениях элементов структурных конструкций в виде шаровых вставок-коннекторов;

– разработанный алгоритм оптимизации структурных конструкций по критерию удельной металлоемкости, отличающийся от ранее реализованных подходов в части учета:

- уточненной оценки несущей способности центрально-сжатых элементов структурного покрытия;

- расширенных подходов к формообразованию проектируемых систем за счет изменения относительной высоты покрытия (при проектировании плоского покрытия) и относительного выгиба покрытия (при проектировании в виде стержневой двухпоясной оболочки);

- податливости опорных конструкций;

– оптимальные значения геометрических параметров покрытия, обеспечивающие оптимальные показатели металлоемкости для проектируемого



большепролетного покрытия на нетиповом прямоугольном плане при использовании типового сортамента стержневых элементов и узловых соединений.

**Теоретическая и практическая значимость** полученных результатов работы состоит в разработке рекомендаций по проектированию структурных покрытий на нетиповых прямоугольных большепролетных планах, обеспечивающих разработку оптимальных по расходу стали проектных решений, базирующихся на:

- уточненной оценке несущей способности центрально-сжатых элементов структурного покрытия, выполняемой с учетом конструктивного оформления их узлового соединения;
- возможности учета влияния податливости опорных конструкций на форму проектируемого покрытия;
- учете возможности изготовителя к реализации разработанного проектного решения либо в виде двухпоясной стержневой оболочки положительной гауссовой кривизны, либо традиционной плоской пространственной системы.

**Методология и методы исследования:**

- методы физического и математического моделирования;
- экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния строительных конструкций;
- аналитические и численные методы механики деформируемого тела.
- статистические исследования регрессионной и корреляционной методиками;
- нелинейное программирование используемое при оптимизации строительных конструкций.

**Положения, выносимые на защиту:**

- методика испытания ячейки структурной конструкции;

- результаты численных и экспериментальных исследований критических усилий при процессе потери устойчивости центрально-сжатых стержней структурной конструкции;
- аналитические выражения для вычисления критического усилия по разработанной соискателем зависимости;
- значения коэффициента приведения геометрической длины к расчетной, учитывающие степень заземления центрально-сжатого стержня в узлах структурного покрытия;
- аналитические выражения для оценки геометрических параметров и удельной массы покрытия на предпроектной стадии;
- рекомендации по проектированию структурных покрытий с шаровыми вставками-коннекторами на высокопрочных болтах.

**Личный вклад соискателя** заключается в разработке физической модели и выполнении экспериментальных исследований, теоретической обработке и интерпретации полученных опытных данных с численными исследованиями, оценке НДС элементов структурных конструкций, разработке алгоритма оптимизации и анализе результатов, полученных на основе его использования, внедрение результатов работы. Представленные в диссертационной работе результаты получены автором самостоятельно. Отдельные составляющие результатов диссертационной работы выполнены с соавторами научных работ, которые изложены в списке публикаций.

**Степень достоверности результатов** подтверждена данными экспериментальных исследований, которые выполнены с применением современных технологий и оборудования в лабораторных условиях, а также соответствием численных исследований НДС ячейки структурного покрытия.

**Апробация диссертационной работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на ежегодных научно-технических конференциях ДонНАСА в период с 2013 по 2020 годы, на международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях (г. Москва, МГСУ, июнь 2013 г) и на

Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации (XXIII научные чтения) (г. Белгород, январь 2020).

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно в 13 научных изданиях, в том числе 9 – в рецензируемых научных изданиях, 2 работы в зарубежных изданиях, индексируемых международной реферативной базой цитирования Web of Science, 2 – публикации по материалам научных конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованной литературы (149 наименований) и приложений. Общий объем работы составляет 185 страниц, в том числе 128 страниц основного текста, 33 полных страниц с рисунками и таблицами, 14 страниц списка использованной литературы, 57 страниц приложений.

«РАЗДЕЛ I. АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ, МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ»

1.1. Анализ существующих конструктивных схем.

Стержневые конструкции «кристаллического» строения впервые были представлены французским ученым Робертом Ле Риколе в виде деревянных ортогональных структур составленных из тетраэдров [131]. К концу 40-х годов, благодаря разработкам французских ученых Р. Ле Риколе, С. Дю Шато и американского ученого Р.Б. Фуллера стержневые плиты, применяемые в структурных конструкциях можно разделить на группы, представленные на рисунке 1.1.

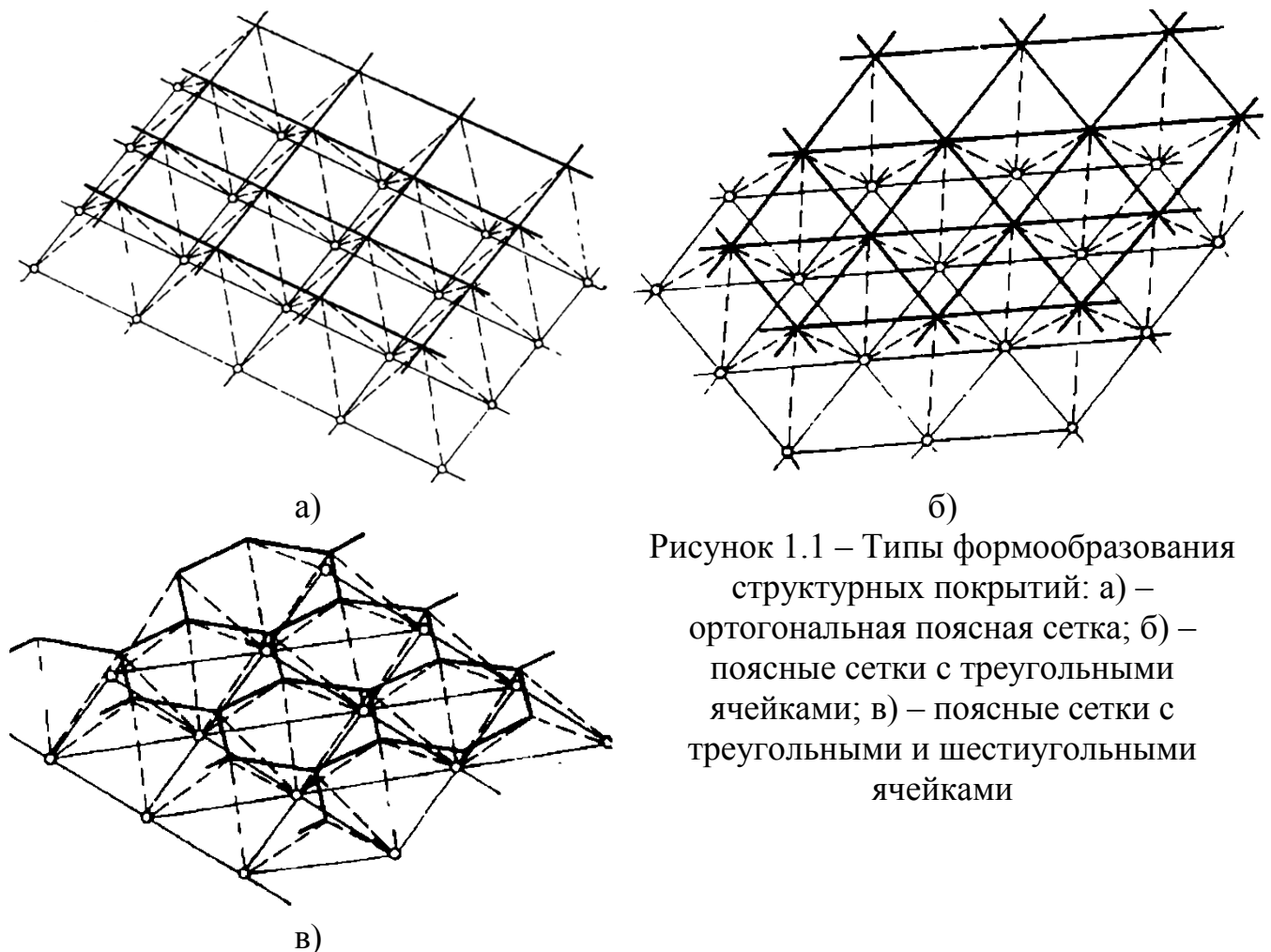


Рисунок 1.1 – Типы формообразования структурных покрытий: а) – ортогональная поясная сетка; б) – поясные сетки с треугольными ячейками; в) – поясные сетки с треугольными и шестиугольными ячейками

В советской школе проектирования, первым проектом такого рода выступило покрытие из трубчатых перекрестных ферм над помещением ВДНХ в

Москве, размерами в плане 24x24 м. Конструкция была разработана в 1959 году Ю.В. Рацкевичем. Расход стали в проекте составил 38 кг/м<sup>2</sup>.

Ещё одним интересным решением следует отметить разработанное проектным институтом Волгоградгражданпроект при консультации лаборатории ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко покрытие рынка в Волгограде. Покрытие в плане 132x48 м расчленено на три блока температурными швами, каждый из которых опирается на 12 металлических колонн с шагом 12 метров по периметру квадрата 36x36 м. Покрытие запроектировано из стальных спаренных уголков, а наиболее нагруженные верхние пояса из парных швеллеров.

С течением времени использование структурных конструкций все больше нашло применение в перекрытии больших пролетов различной конфигурации. Так, стоит отметить использование структурных блоков типа «MERO» в покрытии стадиона «Донбасс-Арена» в Донецке, построенного в 2009 году (Рисунок 1.2, а). Покрытие представляет собой независимо работающие секторы в виде восьми трапециевидных блоков структурных конструкций положительной кривизны с переменными размерами оснований 57,27-61,58x32,96-34,55 м соответственно. Блоки изготовлены из стали S355 (С345 по отечественным нормам) [62]. Еще одним интересным объектом использования той же системы «MERO» является тематический парк в Объединенных Арабских Эмиратах «Le Ferrari World Theme Park», открытый в 2010 году (Рисунок 1.2, б).

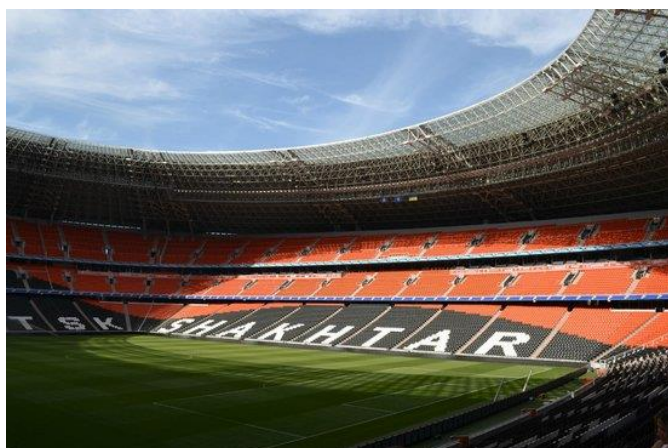


Рисунок 1.2 а – Стадион «Донбасс-Арена», г. Донецк

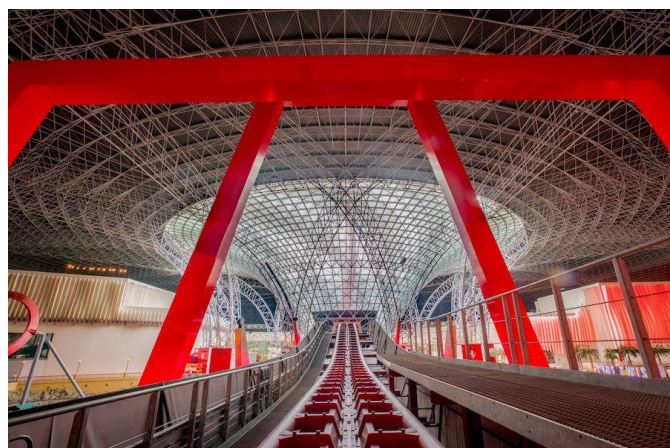


Рисунок 1.2 б – Тематический парк «Le Ferrari World Theme Park», г. Абу-Даби

Наряду с различными решениями формообразованиями ячеек и использования различных сечений стержневых элементов, особое внимание уделялось разработке узловых соединений. На данный момент времени разработано свыше 15-ти конструктивных решений узловых соединений. Наиболее распространенные в практике строительства узлы можно разделить на три группы [72, 89, 91, 92, 95]:

– болтовые соединения: наиболее распространенными решениями следует отметить разработки лаборатории ЦНИИСК им. Кучеренко уголкового стержней внахлест (Рисунок 1.3, а); лаборатории стальных конструкций Мичиганского университета – «Unistrut Corporation», использующие узловые фасонки для соединения на болтах стержней гнутого профиля (Рисунок 1.3, б);

– комбинированные соединения: узловые соединения «МЕРО» (Германия), «МАРХИ» и «Кисловодск» (Россия) объединены единой логикой решения. Основным элементом является сферическое/полусферическое тело с резьбовыми отверстиями, в которые ввинчиваются болты, а наконечниками труб являются плоские цилиндрические шайбы, приваренные к концам трубчатых стержней (Рисунок 1.3, в);

– соединения на монтажной сварке: достаточно распространенным соединением на территории бывшего СССР было конструктивное решение системы «ЦНИИСК». Концы трубчатых стержней сплющиваются и стыкуются в узле, а пространство, образованное между их концами, заполняется расплавленным металлом (Рисунок 1.3, г); соединение «Oktaplatte» (Германия) основывается на приварке к шару трубчатых стержней покрытия (Рисунок 1.3, д).

Помимо вышеперечисленных решений, следует отметить исследования, проводимые на сегодняшний день. Так, с помощью технологий 3D-печати, на основе генетической оптимизации формы узла и предварительной оценки напряженно-деформированного состояния узлового соединения структурных покрытий, 3D-принтером по металлу EOS M280 разработана форма узла покрытия, представленная на рисунке 1.2, е [121]. Такая разработка была представлена на международной конференции Computer-Aided Design &

Applications в 2020 году исследователями из Сингапура и имела множество положительных отзывов в наукометрической базе SCOPUS.

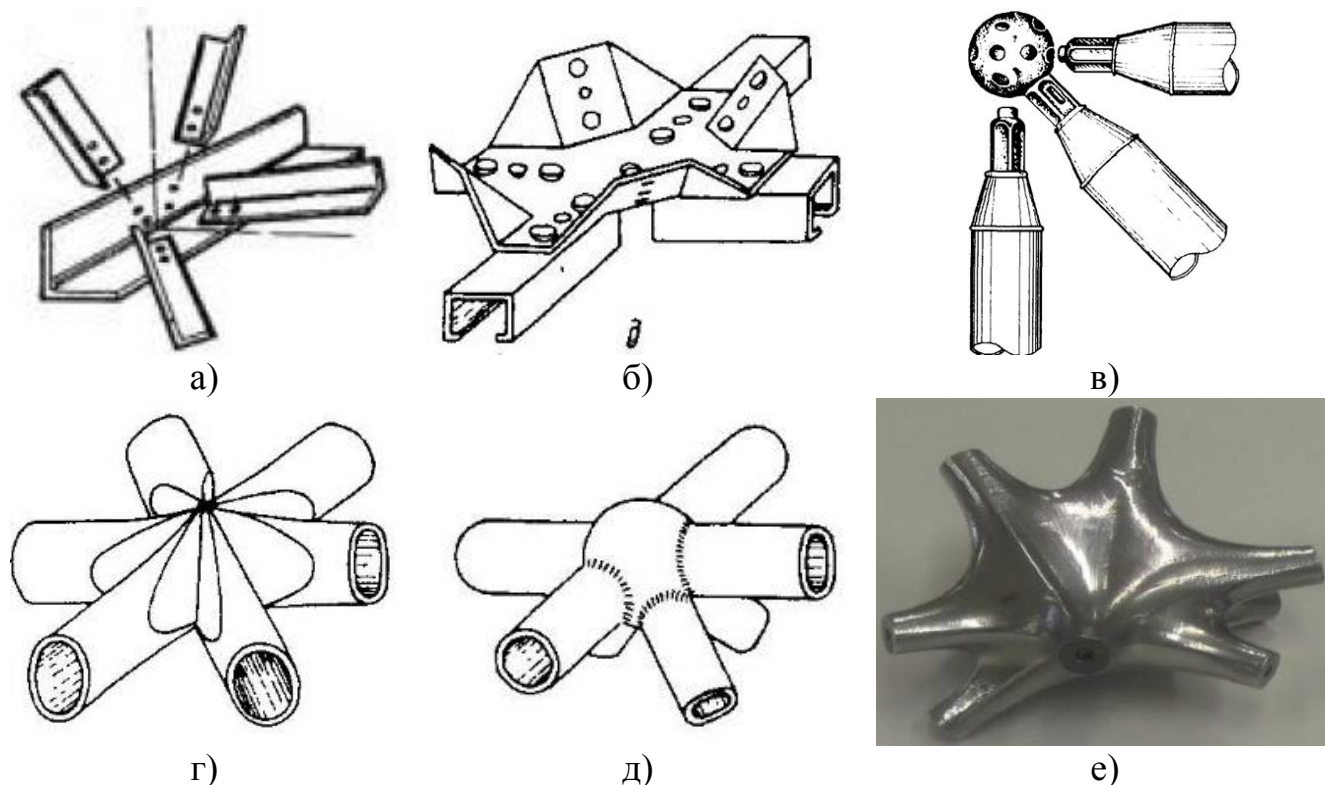


Рисунок 1.3 – Типы узловых соединений в структурных конструкциях

В рамках диссертационных исследований из различных вариантов была принята конструктивная форма системы МАРХИ-КИСЛОВОДСК-МЕРО. Такое решение обусловлено обширным применением в строительстве на территории бывшего СССР. Так, по данным [65], за последние 40 лет проектирования такими системами перекрыто свыше 25 млн. м<sup>2</sup> промышленных и гражданских зданий и сооружений (Рисунок 1.4 а, б). А на сегодняшний день, только одним заводом ОАО «Экспостроймаш» в год выпускается свыше 500000 м<sup>2</sup> металлоконструкций системы «МАРХИ» [38].

Конструкции системы МАРХИ появились в СССР в 70-х годах XX столетия, как плод труда ученых и специалистов кафедры инженерных конструкций Московского архитектурного института. Конструкторами-архитекторами был разработан способ строительства сборных сооружений практически любой формы, мобильных, экономичных и эстетически привлекательных [65]. Система МАРХИ дает возможность проектировать здания

с минимально необходимой объемно-планировочной структурой, отвечающей заданной технической схеме. Геометрические параметры элементов системы МАРХИ подчинены «Единой модульной системе» и позволяют сочетать их с разнообразными ограждениями, стеновыми и кровельными элементами. Конструкции системы МАРХИ могут также сочетаться с малопролётными традиционными конструктивными решениями. Конструктивная система может быть не только перекрытием, но и самим зданием. Конструкции системы МАРХИ обладают повышенной устойчивостью к сейсмическим воздействиям. До минимума сводятся эксплуатационные затраты. Также система является ремонтнопригодным, т.е. поврежденные элементы можно легко заменить на новые, усилить несущую способность всего сооружения не прерывая его эксплуатации.

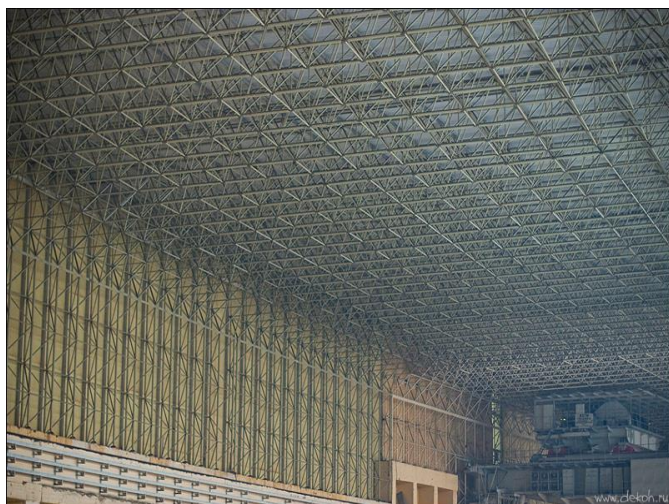


Рисунок 1.4 а – Саяно-Шушенская ГЭС, г. Черемушки



Рисунок 1.4 б – Ледовый стадион в Сокольниках, г. Москва

Унифицированный сортамент системы МАРХИ был создан на основе оптимизации по весу ограниченного числа стержневых и узловых элементов (Рисунок 1.5), выбор которых основывается на трех основных аспектах:

1. Определение градаций несущих способностей стержневых и узловых элементов сортамента, используемых для комплектации практически неограниченного количества монтажных схем пространственных конструкций.
2. Определение рационального числа типоразмеров стержневых и узловых элементов в большом диапазоне несущей способности от 1 до 1000 кН.



3. Стандартизация основных геометрических размеров стержневых и узловых элементов и их соединений, а также применение конструктивных материалов высокой прочности, обеспечивающих оптимальную экономику монтажных марок системы.

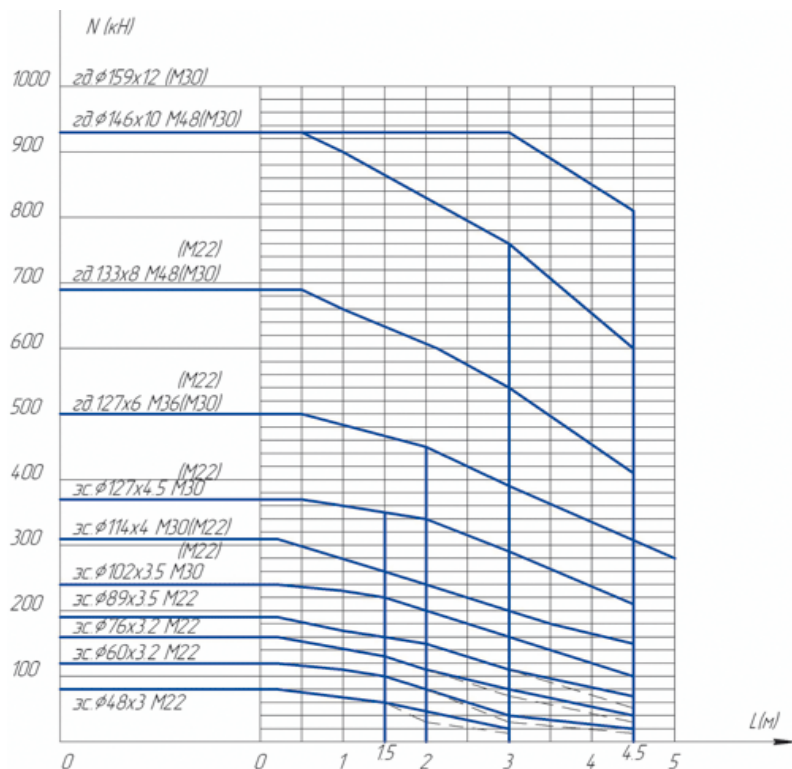


Рисунок 1.5 – Унифицированный сортамент системы МАРХИ

40М–400 см и 45М–450 см. Из них первые три модуля связаны с укрупненным стандартным модулем сеток колонн 60М–600 см отношениями равными 4, 3 и 2, открывает широкие возможности взаимозаменяемости стержневых элементов в любой зоне конструкции. Кроме того, модуль 15М взаимосвязан с модулем 45М а 2х кратный модуль 2х45М связан с 3-мя модулями 30М соотношением 3 (Рисунок 1.4) [65].

Однако, несмотря на положительные стороны рассматриваемого конструктивного решения, наличие сортамента типовых элементов ограничивает применение системы МАРХИ лишь типовыми планами (от 12х12 м до 42х42 м) или требует применения специальных конструктивных решений для повышения несущей способности стержней (например, устройства предварительного напряжения). Расширение возможности применения, связанное с переходом

Закон построения сортамента стержневых элементов системы МАРХИ представлен в виде графика, из которого следует, что количество типоразмеров стержней по сечению равно 11, количество типоразмеров по длине ограничено длиной 5 м, в качестве стандартных укрупненных модулей применяются модули 15М–150 см, 20М–200 см, 30М–300 см,

на нетиповые планы, при сохранении типового набора конструктивных элементов, потребует совершенствования конструктивных решений и разработке новых подходов к формообразованию и проектированию оптимальных структурных покрытий.

## 1.2. Анализ методов расчета и проектирования

### 1.2.1. Аналитические и приближенные методы расчета

Приближенный метод расчета многосвязной плиты изначально был предложен профессором Власовым В.З [14-16]. Расчетная модель являлась дискретно-континуальной и приводилась к совокупности дискретных листовых элементов, рассчитываемых по теории тонкостенных стержней [15]. Такую методику к расчету пространственных стержневых металлических плит и оболочек применили Б.С. Васильков и И.Е. Милейковский. Однако, большинство авторов рассматривают покрытия, опертые по контуру. Д. Сбарони, С. Симеоновым и Ф. Ледерером даны решения дифференциальных уравнений ортотропных пластинок-моделей до определения усилий в стержнях по всей площади структуры.

Вышеперечисленные авторы используют для расчета структурного покрытия решение задачи теории изгиба тонких пластинок, основным уравнением которого является уравнение Софи-Жермен:

$$D \cdot \nabla^4 \cdot w - q = 0 \quad (1.1)$$

где  $D = \frac{E \cdot t^3}{12(1-\mu^2)}$  – цилиндрическая жесткость пластины;

$t$  – эквивалентная толщина пластины;

$\nabla$  – оператор Лапласа [9];

$w(x; y)$  – функция прогиба пластины;

$q(x; y)$  – функция нагрузки, действующей на пластину.

Конкретные решения получаем от различных условий закрепления на контуре пластинки. Указанные решения лежат в основе инженерного метода расчета структурных покрытий, изложенного в работах Трущева А.Г [91]

Изгибающие моменты и поперечные силы в прямоугольной плите зависят от условия опирания и соотношения сторон перекрытия. В основном различные

схемы прямоугольных пластинок возможны в неразрезной конструкции с опиранием на ряды колонн или подстропильные элементы, когда для определения изгибающих моментов перекрытие расчленяют на отдельные участки, заземленные по линии сопряжения с соседними пролетами (Рисунок 1.6-1.7).

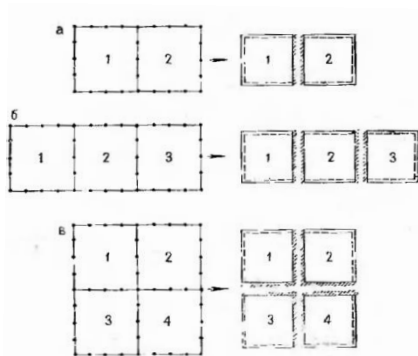


Рисунок 1.6 – Примеры расчленения неразрезной плиты на отдельные участки для определения изгибающих моментов:  
а) 2-х пролетное покрытие; б) 3-х пролетное; в) 4-х пролетное.

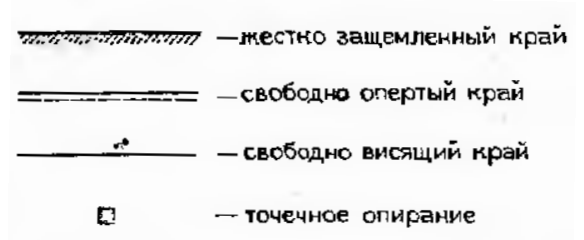


Рисунок 1.7 – Условные обозначения опирания плит

На графиках ниже (Рисунок 1.8) предложены варианты определения усилий в прямоугольных плитах [91]:

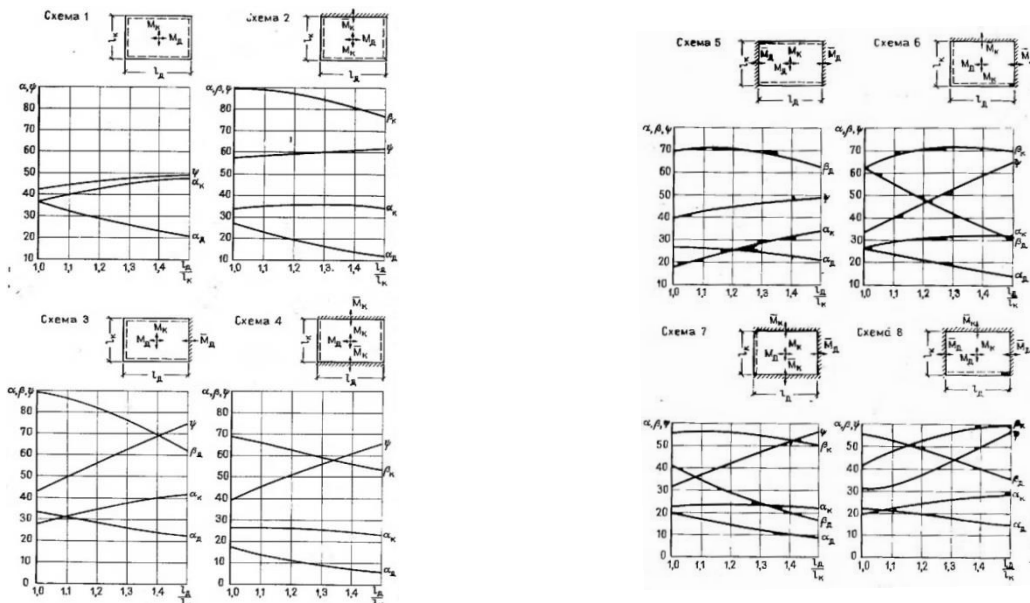


Рисунок 1.8 – Графики для определения усилий в прямоугольных плитах при равномерно распределенной нагрузке (коэффициент Пуассона  $\nu = 0$ )

Помимо приближенных методов расчета Трущева А.Г., анализировались методики, изложенные в работах Хисамова Р. И. [95], а именно:

1. Приближенный расчет структурных пластинок покрытия с использованием решений пластинок. Этот метод соответствует методу, изложенному у Трущева.

2. Приближенный расчет структурных конструкций, как перекрестно-балочных систем. Метод сводится к составлению  $n$  числа линейных уравнений типа:

$$\sum_i (\omega_{-2} - 4\omega_{-1} + 6\omega_0 - 4\omega_1 + \omega_2) = \frac{q \cdot a^6}{EI} \quad (1.2)$$

$(i = x, y)$

$$\sum_i (\omega_{-2} - 4\omega_{-1} + 6\omega_0 - 4\omega_1 + \omega_2) = \frac{\sqrt{3} \cdot q \cdot a^5}{2EI} \quad (1.3)$$

$(i = \alpha, \beta, \gamma)$

и их решению относительно прогибов узлов поясных сеток. Анализируемый подход к расчету в большей степени, на наш взгляд, применяется для систем с небольшим пролетом, поскольку дискретность в таком случае имеет гораздо большее значение, чем для рассматриваемых нами систем структурных покрытий на большепролетных планах.

3. Приближенный расчет структурных покрытий в упруго-пластической стадии работы. Этот метод основан на расчете структурных конструкций с возможным развитием пластических деформаций в пределах одной, наиболее загруженной панели фермы и имеет в большей степени теоретическое значение, поскольку приложение конструкции знакопеременных нагрузок при таком характере работы материала может в дальнейшем привести к исчерпанию площадки текучести и последующего хрупкого разрушения элемента конструкции. Указанный характер работы элемента конструкции является недопустимым с точки зрения классификации ее работоспособности, несмотря на многосвязность системы в дальнейшем будет классифицироваться, как ограничено работоспособный, требующий в дальнейшем восстановления первоначально несущей способности.

Помимо вышеперечисленных авторов, вопросами исследования напряженно-деформированного состояния структурных конструкций аналитическими, приближенными методами и формообразованием также занимались ученые ЦНИИСК им. Кучеренко [72], В.А. Гастев [21], Л.Н. Лубо [21, 52-24], С.Г. Лехницкий [50], В.И. Трофимов, Г.Б. Бегун, В.И. Каминский [89], В.К. Файбишенко [92], D. Argiris [102].

Если плиты рассчитывать точно, то их следует рассматривать как многократно статически неопределимые стержневые системы и использовать специально составленные программы для ЭВМ. Кроме того, при реальном проектировании усилия в стержнях различных зон плиты вычисляют в зависимости от геометрии конструкции, способов опирания, приложения нагрузок и т.д. Поэтому применение таких методов возможно на стадии эскизного проектирования стержневых плит [91].

#### 1.2.2. Численные методы расчета

Первые работы в этой области по расчету структур разрабатывались европейскими и американскими исследователями Ю. Доттер, Д. Джонсон, Д. Брэдли в 1960-годах. Однако конечный результат, позволяющий на основе метода перемещений и конечных разностей, был создан для шведской ЭВМ SAAB-D-21 фирмой «Хемопроект». Программа позволяла рассчитывать структурные покрытия до 10000 неизвестных до 100 элементов.

В Советском Союзе разработкой программ на ЭВМ занимались научно-практические центры Гипротис, КиевЗНИИЭП, ЦНИИСК им В.А. Кучеренко, ЛенЗНИИЭП, ЦНИИПроектстальконструкция и УкрНИИпроект. Последние, при участии А.В. Городецкого, создали программу «СТРЕСС», позволяющую также на основе метода перемещений рассчитывать схемы практически с неограниченным количеством стержней в конструкции и с наличием 1500-2000 узлов.

С течением времени и роста технологических возможностей, на базе различных ЭВМ в середине 1970-х годов был реализован метод конечных

элементов (МКЭ), позволяющий отображать в расчетной схеме все стержневые элементы с последующим индивидуальным анализом НДС. Одной из первых работ в этой области следует отметить работу Konieczny S. и Wozniak Cz. в рамках научной конференции в Польше в июне 1973 году. В работе представлено исследование НДС многократно статически-неопределимого структурного покрытия с помощью МКЭ.

В дальнейшем, МКЭ стал общепринятым методом численного анализа строительных конструкций. Хотя стоит отметить, что исторически возникновение метода конечных элементов (МКЭ) связано с идеей применения хорошо разработанных процедур для расчета статически неопределимых стержневых систем к решению континуальных задач. Первоначально эта идея была высказана еще в 1933 году И. М. Рабиновичем.

Метод конечных элементов основан на представлении сплошного тела в виде совокупности отдельных конечных элементов, взаимодействующих между собой в конечном числе точек, которые в МКЭ принято называть узлами. Система разбивается на простые конечные элементы (КЭ) напряженно-деформированное состояние которых исследуется заранее. При реализации МКЭ наибольшее распространение получили идеи метода перемещений, хотя имеются работы, где рассматривается метод сил и смешанный метод. Предпочтение методу перемещений отдано в основном из-за простоты выбора основной системы, составления матрицы жесткости и формирования вектора внешних нагрузок.

Подход к решению задачи МКЭ является единым, как для стержневых систем, так и для пластин, оболочек и объемных тел. На сегодняшний день на базе МКЭ создано множество различных программных комплексов, позволяющих производить оценку НДС элементов строительных конструкций. В отечественной практике особенно широко используются программные комплексы SCAD Office и программный комплекс семейства ЛИРА-САПР.

Помимо вышеперечисленных авторов, вопросами моделирования и исследования НДС структурных конструкций методом конечных элементов занимались А.А. Василькин [11, 143], В.В. Денякова [11], Г.М. Кравченко, Е.В.

Труфанова [45], А.Б. Бондарев, А.М. Югов [8], М.Р. Гарифуллин [19], А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер [66] E. Gaylord, C. Gaylord, J. Stallmeyer [118], M. Schumacher [139], M. Buijisen [103], R. Hutchinson [124], N. Hubermana [123], C. Jianguo [105], A. Rosen, M. Sabag, [138], J. Renton [137], N. Antonioua [101], M. Gordini, M. Habibi [119], V. Hassani [121], Cheng Lan, Xi Tu, [108], Chao Li, Jia Xu [107], Cong Liu, Lin He [109], J. Dzwierzynska [110], A. Causevic, A. Salihbegovic [106], Xiaoshu Guan, Huipin Chen [120], R.A. Fitrah, Nonfriyandi R. [116], Li-Min Tian, Jian-Peng Wei [132]. Однако следует отметить, что такие методы применялись при проектировании покрытий с относительно небольшими размерами в плане (до 42x42 м), что ограничивает возможность их увеличения при использовании традиционного для структурных покрытий сортамента труб и элементов узловых соединений. Также следует отметить, что вопросы исследования НДС структурных конструкций за счет варьирования опорных закреплений и размерами в плане частично раскрыты в работах вышеуказанных авторов, однако данные исследования ограничивались традиционной для структурных покрытий плоской формой без обобщения этих результатов на другие конструктивные формы пространственных стержневых покрытий (например, в виде двухпоясных стержневых пологих оболочек).

### 1.3. Общее понятие потери устойчивости и анализ норм проектирования

Переход сооружения из устойчивого состояния в неустойчивое принято называть потерей устойчивости, границу этого перехода – критическим состоянием сооружения, а соответствующие нагрузки – критическими нагрузками.

Процесс потери устойчивости происходит очень быстро и практически ведет к разрушению сооружений.

Известен целый ряд катастроф крупных инженерных сооружений, происшедших в результате потери устойчивости всего сооружения или отдельных его элементов. Это катастрофы на грани XIX - XX столетий: крушение Менхенштейнского моста в Швейцарии в 1891 году, Квебекского моста через

реку Св. Лаврентия в 1907 году крушение Гамбургского газгольдера в 1907 году и др [47].

Для формулировки цели исследования, представленного в данной работе, отметим несколько общеизвестных, устоявшихся положений теории устойчивости:

- переход сооружения из устойчивого состояния в неустойчивое принято называть потерей устойчивости, границу этого перехода – критическим состоянием сооружения, а соответствующие нагрузки – критическими нагрузками;

- различают два вида потери устойчивости: потеря устойчивости положения и потеря устойчивости первоначальной формы равновесия (последнее характерно для рассматриваемого нами случая);

- различают потерю устойчивости  $\Gamma^0$  рода (продольный изгиб прямолинейного стержня, сжатого осевой силой, когда потеря устойчивости сопровождается возникновением нового вида деформации изгиба вместо сжатия, имевшего место при  $P \leq P_{кр}$ ) и  $\Pi^0$  рода (потеря устойчивости внецентренно сжатых стержней, стержней подверженных действию продольных и поперечных нагрузок, когда вид деформации не меняется, но деформации стержня при  $P \approx P_{кр}$  начинают быстро возрастать, даже без увеличения нагрузки).

- основными методами исследования определения критических сил являются статический, динамический и энергетический методы.

Динамический метод основан на уравнении частоты собственных колебаний стержня, сжатого силой  $P$ . Критическая сила  $P_{кр}$  определяется исходя из условия равенства собственных колебаний стержня нулю.

Суть энергетического метода исследования устойчивости заключается в следующем:

- если полная потенциальная энергия системы  $\mathcal{E} = \min$ , то она находится в состоянии равновесия;



– если полная потенциальная энергия системы  $\mathcal{E} = \max$ , то она находится в неустойчивом состоянии;

– если  $\mathcal{E} = \Delta U - \Delta T = 0^*$ , то система находится в безразличном состоянии

\* -  $\Delta U$  – приращение потенциальной энергии внутренних сил;  $\Delta T$  – внешних сил.

Статический метод позволяет при задании возможного вида деформированной оси элемента из характеристических уравнений деформирования определить те значения  $P_{кр}$  внешних сил, при которых возможна новая форма равновесия (Рисунок 1.9). В рамках планируемого исследования устойчивости центрально-сжатых стержней он является наиболее подходящим с точки зрения физической природы процесса потери устойчивости стержней, простоты применения и реализации в работе

Само же начало исследования теории устойчивости сжатых стержней происходит от решения задачи о равновесии прямолинейного упругого стержня, нагруженного сжимающей продольной силой. Такую задачу решил Л. Эйлер в 1744 году [113]. Позже, в 1892 году Ф. С. Ясинский в своих трудах [100] обосновал влияние материала, расчетной длины и гибкости упругого стержня на процесс потери устойчивости (бокового выпучивания). Хотя стоит отметить, что первые попытки замены модуля упругости в формуле Эйлера касательным модулем принадлежала F. Engesser в 1889 году [112]. В дополнение к вышеуказанному, в трудах Б. Г. Галеркина [17] и И. Г. Бубнова [9] сформулированы аналитические критерии потери устойчивости, которые в дальнейшем послужили основой для создания практических методов решения таких задач. Так же Б.Г. Галеркин впервые провел исследования устойчивости упругих систем [18], которые являются некой точкой отсчета исследования потери устойчивости центрально-сжатых стержней структурных конструкций.

В период 1925-1950-х годов Н.С. Стрелецким [73] и А.Р. Ржанициным [84] произведен анализ коэффициента запаса, основанного на базе теории вероятностей, что в дальнейшем отражается в переходе к расчету конструкций по предельным состояниям. Определенного рода обобщением и интеграцией результатов в единую для понимаю систему процесса потери устойчивости

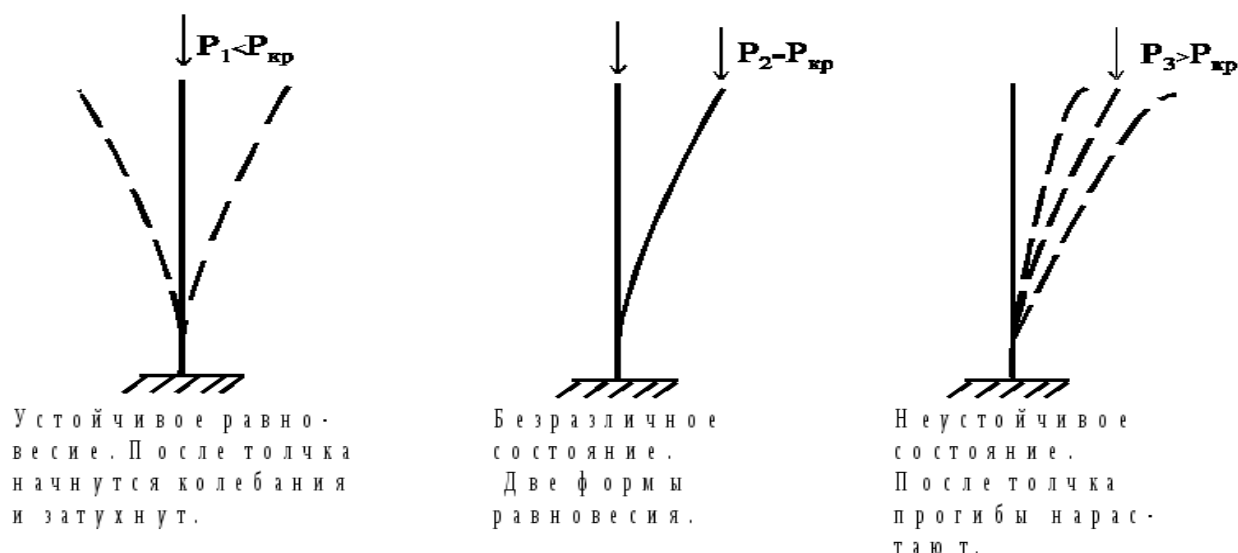


Рисунок 1.9 – Статический метод исследования потери устойчивости упругого стержня послужили труды С.П. Тимошенко и J. Gere [142], С.Д. Лейтеса [49].

Анализируя вышесказанное, следует отметить, что влияние на величину расчетной критической силы оказывает гибкость стержней, используемый материал, условия закрепления стержня и его вид деформированной оси.

Касательно структурных конструкций, условия работы стержней из условия устойчивости в составе покрытия более благоприятны, нежели в обычных плоских фермах. Такой фактор обусловлен препятствием поворота стержня в составе покрытия группой соседних стержней, примыкающих в узел. Благодаря реализации МКЭ в решении задач устойчивости, следует особое внимание уделить трудам А.В. Перельмутера и В.И. Сливкера в 3-х томах [67]. Исследование процесса потери устойчивости с помощью МКЭ указывает на значительное влияние отличия фактических закреплений стержня от идеализированных и предполагаемой формы потери устойчивости. Поэтому, именно такой подход позволяет реализовать наиболее последовательный учет фактических опорных закреплений, обусловленных применяемыми конструктивными реализациями узловых соединений элементов структурных конструкций, а также, генерируя соответствующую сетку узлов расчетной схемы,

описать наиболее точным образом начальное несовершенство, характерное для последующего деформирования стержня в процессе потери устойчивости.

Таким образом, одной из задач исследования является уточнение величины критической силы и форм потери устойчивости центрально-сжатых стержней структурного покрытия на основе учета конструктивных решений узловых соединений и фактических сечений элементов.

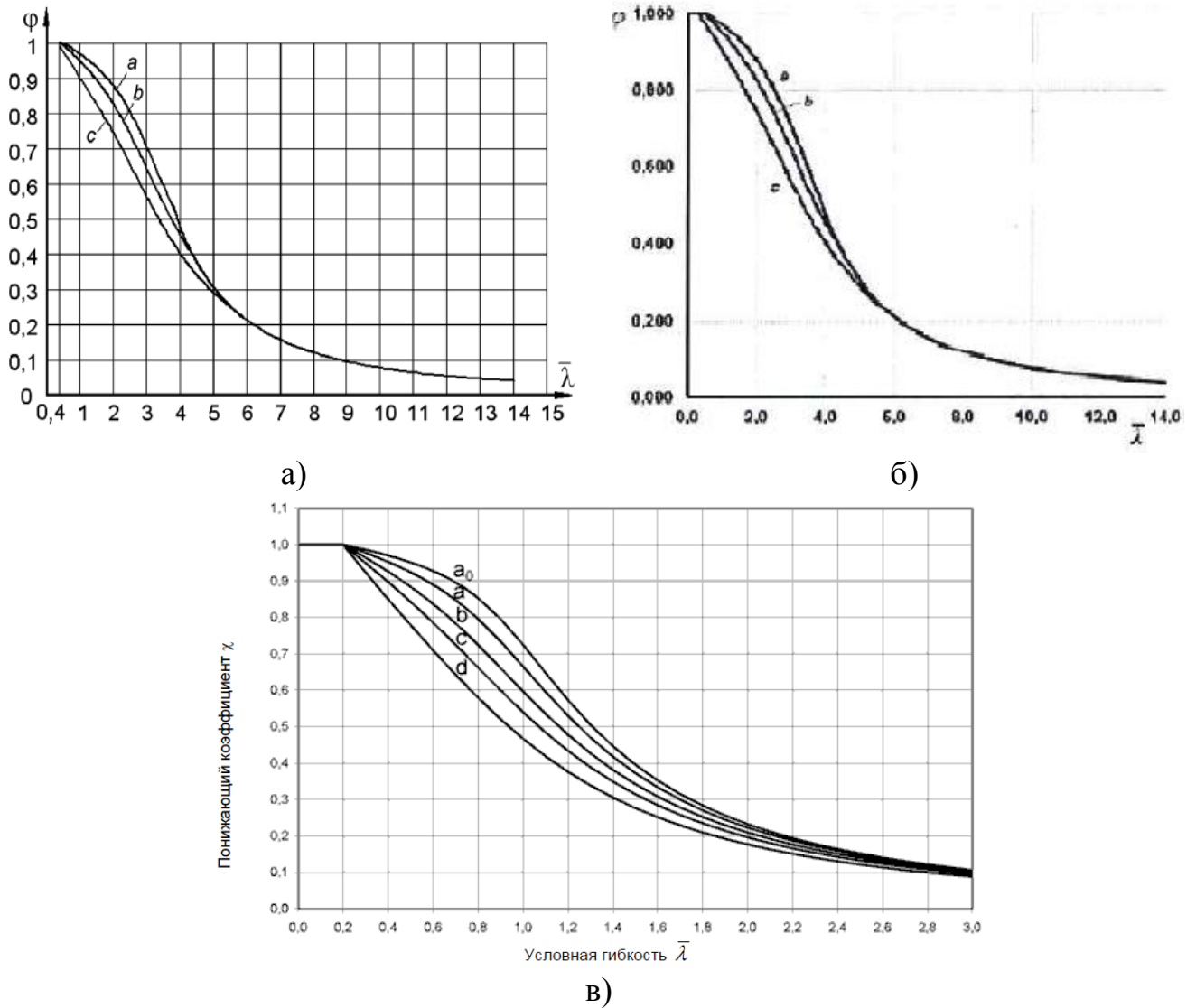


Рисунок 1.10 – Сравнение кривых устойчивости по отечественным и зарубежным нормативным документам

Для проведения анализа норм проектирования выбираем три нормативных документа: ДБН (Украина) [36], СП (Россия) [83], Еврокод 3 (Европа) [114]. В рамках исследования устойчивости за основу сравнения возьмем три кривых устойчивости, представленные в указанных нормативных документах (Рисунок

1.10 а-в). Так, следует отметить, что в основу нормативных документов на территории Украины [36] центрально-сжатые стержни рассчитываются на устойчивость с учетом коэффициента устойчивости для элементов с центрированным приложением нагрузки, который учитывает:

- форму поперечного сечения элемента;
- начальные несовершенства сечения;
- влияние остаточных деформаций при изготовлении → остывании материала;

что в дальнейшем отражается на кривой устойчивости, представленной на рисунке 1.10 а.

Анализируя несущую способность из условия устойчивости, предложенную в нормативном документе Российской Федерации [83] следует отметить, что кривая устойчивости, представленная на рисунке 1.10 б, основана на тех же принципах, что и по украинскому ДБНУ, но с одним важным отличием. Проверка центрально-сжатых стержней проводится на основе расчета внецентренно-сжатых стержней с учетом влияния формы сечения, начального искривления оси и случайного эксцентриситета от сжимающей силы. То есть, по сути, при проверке на устойчивость центрально-сжатого стержня в основу коэффициента устойчивости положен стержень, на который нагрузка приложена внецентренно с учетом предположений о малых перемещениях и ведением расчета по деформированной схеме.

Подходы к проверке элементов из условия устойчивости в западном Еврокоде [114] следует отметить, что в основу положено соотношение расчетного значения сжимающей силы к значению несущей способности сжатого элемента по устойчивости. Второе значение зависит на прямую от понижающего коэффициента, на основе которого построены кривые устойчивости, представленные на рисунке 1.10, в. Этот коэффициент учитывает начальные несовершенства для кривых потери устойчивости при центральном сжатии. В Еврокоде представлено пять кривых потери устойчивости, зависящих от

материала, формы и толщины сечения, учета остаточных деформаций и сварных соединений в конструкциях.

Методики расчета, предложенные в документах перечисленных выше, занесены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение норм проектирования

| № п/п | Категория                                      | ДБН В.2.6-198:2014 (Украина)                        | СП 16.13330.2017. (Россия)                | Еврокод 3, часть 1-1 (ЕС)          |
|-------|--|---|---|------------------------------------|
| 1     | 2  | 3   | 4   | 5                                  |
| 1     | Расчет центрально-растянутых стержней          | $\frac{N\gamma_n}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1$         | $\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1$       | $\frac{N_{ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$   |
| 2     | Расчет центрально-сжатых стержней              | $\frac{N\gamma_n}{\varphi A_n R_y \gamma_c} \leq 1$ | $\frac{N}{\varphi A R_y \gamma_c} \leq 1$ | $\frac{N_{ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$ |
| 3     | Расчетные длины и предельная гибкость стержней | В соответствии с указаниями табл. 13.3              | В соответствии с указаниями табл. 26      | -                                  |

Следует отметить, что в рамках исследований соискателя рассматриваются только стержни выполненные из горячекатаных труб, имеющие не изменяемую толщину стенки по длине элемента. Поэтому для дальнейших исследований в расчете принимается использование украинского ДБНа.

Помимо вышеперечисленных работ и нормативных документов, вопросами исследования устойчивости центрально-сжатых стержней также занимались А.Ю. Солдатов [82], А.А. Артёмов [6], И.Д. Аникеев, А.В. Голиков [4], Б.Д. Аннин, А.Ю. Власов [5], В.И. Клименко [40], К.Д. Каримбаев, Д.С. Пальчиков [39], В.В. Зверев [7, 149], И.М. Гаранжа [117], Р. Хуснутдинов, Ю. Коноплев [127], Y. Zheng [148], Q.-S. Mu [133], Fang Youngfeng, Wang Li [115], Bin Li, Hua Luo [103], Z. Kala [126]. Отметим, что вопросы потери устойчивости в упругой и упруго-пластической стадиях работы материала достаточно широко раскрыты в работах вышеуказанных авторов. Однако, модели, рассматриваемые в работах, представляют собой идеализированную расчетную схему без учета тщательного моделирования узловых соединений и их влияния на поведение конструкции под нагрузкой.

1.4. Анализ проведенных экспериментальных исследований структурных конструкций.

Первые экспериментальные исследования в области напряженно-деформированного состояния структурных конструкций были проведены американскими инженерами фирмы «Unistrut Corporation» в конце 1950-х годов. Испытаниями определена предельная нагрузка для системы «Unistrut». Немного позже, в начале 1960-х годов, немецкий профессор К. Kleppel испытывал шаровые вставки-коннекторы системы «Oktaplatte», позволившие получить оптимальное соотношение диаметра коннектора к толщине трубы, равное 2,5.

Также следует отметить серию экспериментальных исследований американских ученых в период с 1964-1969 г. Испытания проводились на моделях структурных конструкций с различными конструктивными решениями узловых соединений, различным используемым материалом (сталь, пластик, алюминий) и различным подобием (от 1:1 до 1:47). В большинстве случаев, полученные результаты НДС имели близкие значения с расчетными, что подтвердило работоспособность многих решений узловых соединений, таких как «Triodetik», «Met-Ram», «Pyram-Roof».

В СССР первые экспериментальные исследования НДС структурных конструкций проводились в Ростовском Промстройниипроекте исследователем Б.А. Пушкиным. Испытания металлической модели с ортогональной поясной сеткой в масштабе 1:50, позволили построить линии влияния для структуры квадратного плана, опертой в четырех точках. Также следует отметить испытания Л.Н. Лубо на стальной модели 10x10 ячеек, размерами в плане 2x2, испытания А.А. Калинина, создавшего модель из проволоки, диаметром 1,2 и 2,3 мм соответственно. Полученные результаты позволили установить отклонения от расчетных значений НДС в пределах 10-20%.

В рамках диссертации, более подробно остановимся на экспериментальных исследованиях В.К. Файбишенко [93]. В основу испытаний положены узлы структурного покрытия типа «MERO» близкие по конструктиву с «МАРХИ». На первом этапе испытывались одиночные стержни в составе «Коннектор-Болт-

Шар». В основу исследований положены вопросы влияния марки стали и термической обработки стали на несущую способность. В ходе эксперимента было установлено, что закаленный болт и незакаленный шар имеют более высокие показатели по несущей способности, нежели все закаленные элементы. Также, исследовались вопросы устойчивости стержней с учетом неточности центрирования приложенной нагрузки и влияние начальных напряжений в узловом соединении на несущую способность. Завершающим этапом испытаний было испытание четырех ячеек в составе фрагмента структурного покрытия, загружаемых гидравлическим домкратом (Рисунок 1.11). Особое внимание уделялось жесткости системы и в меньшей мере напряженному состоянию конструкции.

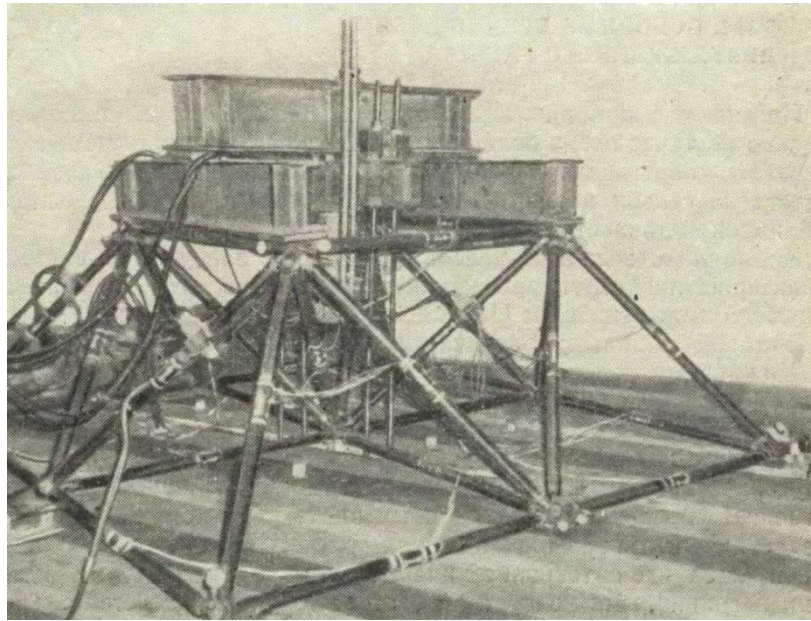


Рисунок 1.11 – Испытание В.К. Файбишенко фрагмента покрытия на жесткость

На сегодняшний день, исследователи из Сингапура V. Hassani, Z. Khabasi исследовали напряженное состояние узлового соединения в составе конструкции покрытия [121]. На основе полученных результатов, на 3D-принтере по металлу представлены два вида узлового соединения (Рисунок 1.12 а, б). На основе экспериментальных исследований (Рисунок 1.12, в) сравнивались показатели НДС полученных узловых соединений. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность узла, представленного на рисунке 1.12, б.

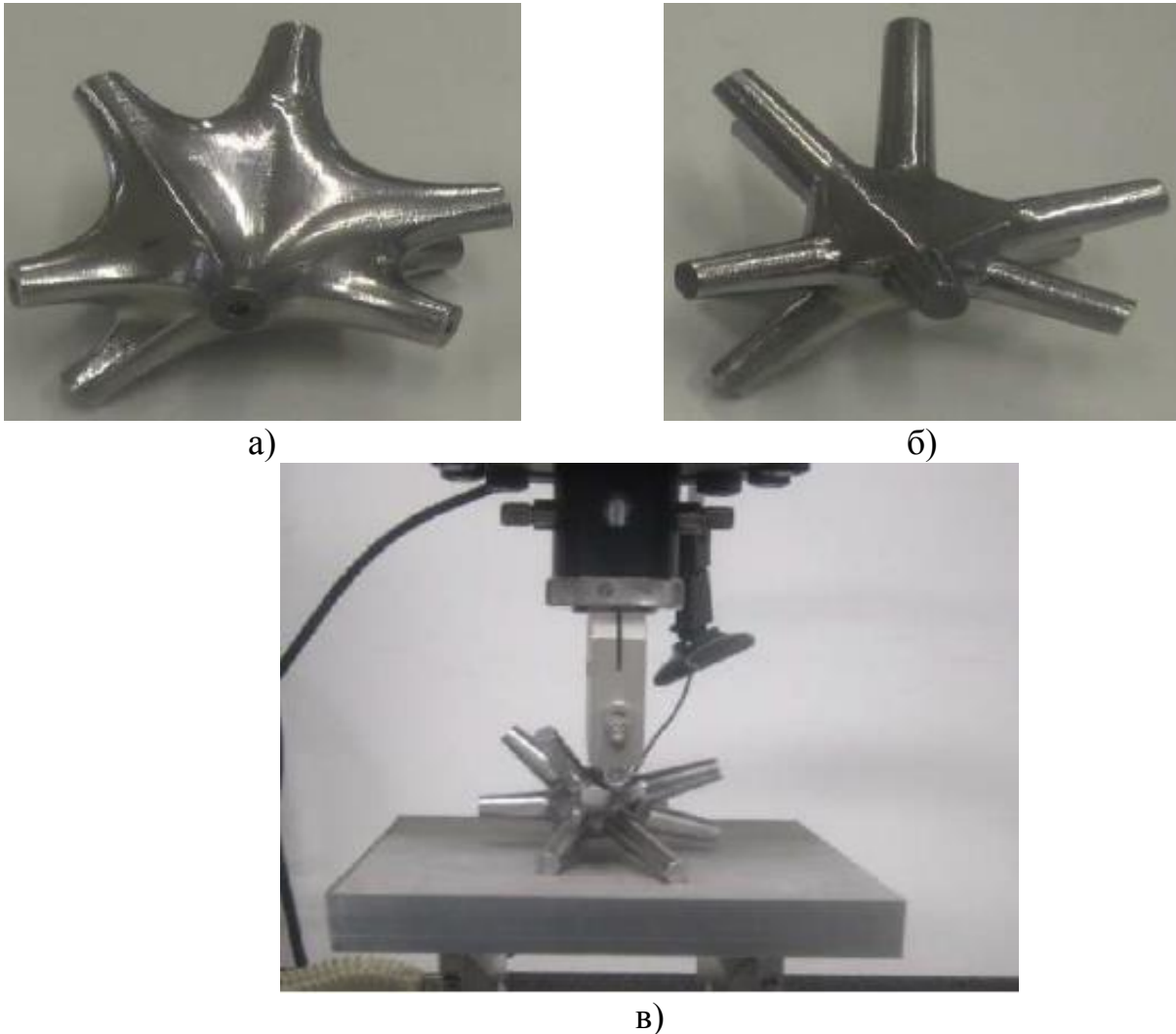


Рисунок 1.12 – Экспериментальные исследования напряженного состояния узловых соединений V. Hassani, Z. Khabisi

Следует отметить, что все выше представленные исследователи занимались в большинстве своем вопросами НДС узловых соединений структурных покрытий. В меньшей мере вопросами устойчивости сжатых раскосов покрытия. Однако влияние начальных геометрических несовершенств стержней покрытия и влияния жесткости узлового соединения на несущую способность раскосов из условия устойчивости выполнены не были.

1.5. Анализ подходов к оптимизации конструктивных форм структурных покрытий.

Оптимизация конструкций представляет собой целенаправленный выбор наилучшего варианта из множества допустимых проектных решений, обусловленных различными значениями переменных параметров. Инструктивные



материалы предлагают критерием экономической оценки качества сравниваемых вариантов считать приведенные затраты. Они складываются из единовременных затрат и текущих расходов за нормативный срок окупаемости капитальных вложений. Реальное содержание составных частей приведенных затрат зависит от того, чем разнятся сравниваемые затраты.

Эффективность оптимального проектирования структурных конструкций в основном определяется способами постановки и реализации оптимизационных задач. При постановке задачи в оптимизационную модель вводят различные компоненты, влияющие на указанные показатели. Прежде всего – это состав варьируемых параметров. Чем больше параметров считаются заданными фиксированными, тем проще решение задачи, но слабее эффект оптимизации. Другим важным компонентом постановки задачи является выбор критерия качества проекта (критерия оптимальности). Обычно это экстремальное значение функции искомых параметров, называемой целевой, или функцией цели. Самый известный критерий качества – металлоёмкость.

Первые решения оптимизационных задач в своих трудах представил И.М. Рабинович [69] в 1933 году. Они имели основу вариационного и дифференциального исчисления и относились к аналитическим методам математической оптимизации. Позже, в 50-х годах Е.И. Вареник [12] и А.И. Виноградов [13] разрабатывали основы технико-экономического анализа и расчета сооружений наименьшего веса.

Касательно структурных покрытий, в 1968 году Б.А. Пушкин исследовал решетчатые плиты из двух одинаковых поясных сеток с прямоугольными ячейками и раскосами одной длины, принимая за критерий качества теоретический расход металла, а варьируемыми параметрами – размеры ячейки в плане и по высоте. Но следует отметить, что вследствие малой эффективности использования математического аппарата и сложности установления взаимосвязи между параметрами, значимых результатов аналитические методы исследования не принесли.

Одним из основополагающих этапов оптимального проектирования являющимся некой отправной точкой в выборе оптимальных критериев является вариантное проектирование. Фундаментальными работами в области многовариантного расчета являются труды профессора Лихтарникова Я.М [51], которые позволили определить трудозатраты, стоимость и массу конструкции на основе многовариантного расчета конструкций. Следует отметить, что на основе трудов Я.М. Лихтарникова в бывшем МакИСИ (ныне ДонНАСА) его последователи, о которых речь пойдет немного позже, с помощью уже внедрения математического программирования в процесс оптимизации, своими работами решили задачу оптимального проектирования для вантовых и мембранных систем. Однако, возвращаясь к трудам Якова Моисеевича следует отметить, что главным недостатком вариантного проектирования является выбор начальных параметров конструктивной формы на предпроектной стадии, которое, по сути, основывается только на опыте и интуиции проектировщика.

На стыке 1960-1970-х годов с появлением ЭВМ в решение оптимизационных задач включаются численные методы оптимизации, основанные на методах математического программирования (линейное, выпуклое, геометрическое, нелинейное и т.д). Основополагающим в области линейного программирования являются труды В.В. Трофимовича [90] по внедрению симплекс-метода в приложении к конструкциям ферм. Однако следует отметить, что в исследованиях соискателя зависимость между функцией цели и ограничениями нелинейная (см раздел II, пункт 2.3). Поэтому подробнее остановимся на методах нелинейного программирования.

В рамках нелинейного программирования для решения задач оптимизации разработаны многочисленные алгоритмы, которые можно подразделить на некоторые методы:

- нулевого порядка, использующие только значение целевой функции;
- первого порядка, использующие значения первых производных;
- второго порядка, использующие значения вторых производных.

Так, на основе нелинейного программирования решалась задача оптимизации стальных конструкций А.И. Агеевым и Н.Д. Сергеевым [1]. А с появлением и развитием в строительстве систем автоматизированного проектирования (САПР) задачи оптимального проектирования методами нелинейного программирования начинают решаться в их рамках. Существенный вклад в этой области внесен В.Н. Гордеевым на основе оптимального проектирования САПР-ЦНИИСК. Разработанные программы позволяющие исследовать окрестность оптимального решения, оценить потери при отклонении параметров конструкции от оптимальных.

Возвращаясь к предыдущему упоминанию учеников Я.М. Лихтарникова следует отметить что также методами нелинейного программирования А.П. Скалауховым [81] была решена задача оптимального проектирования в применении к вантовым системам, Е.В. Шевченко в применении к опорам ЛЭП [96], а И.В. Роменским [76] в применении к мембранным покрытиям. Двое последних упомянутых авторов реализовывали численные методы оптимизации при помощи метода Нелдера-Мида, относящегося к методу нулевого порядка.

Главным достоинством метода нулевого порядка, который используется в данной работе, является возможность нахождения экстремума функции, заданной не аналитически, а в виде алгоритма, а также отсутствие требований неразрывности. К таким способам следует отнести методы Хука-Дживса (Рисунок 1.13, в) [122], вращающихся координат Розенброка (Рисунок 1.13, б) [94], параллельных касательных Пауэлла [94]. Однако к существенным недостаткам следует отнести отсутствие использования информации, полученной на предыдущих итерациях и слабая приспособляемость симплекса к рельефу функции. Таких недостатков лишена модифицированная процедура поиска по симплексу, называемая методом Нелдера-Мида или методом деформируемого многогранника (Рисунок 1.13, а) [135]. Метод, в достаточной степени апробирован исследователями, о которых упоминалось в предыдущем абзаце, и показал положительные результаты при нахождении точки минимума в применении к строительным конструкциям.

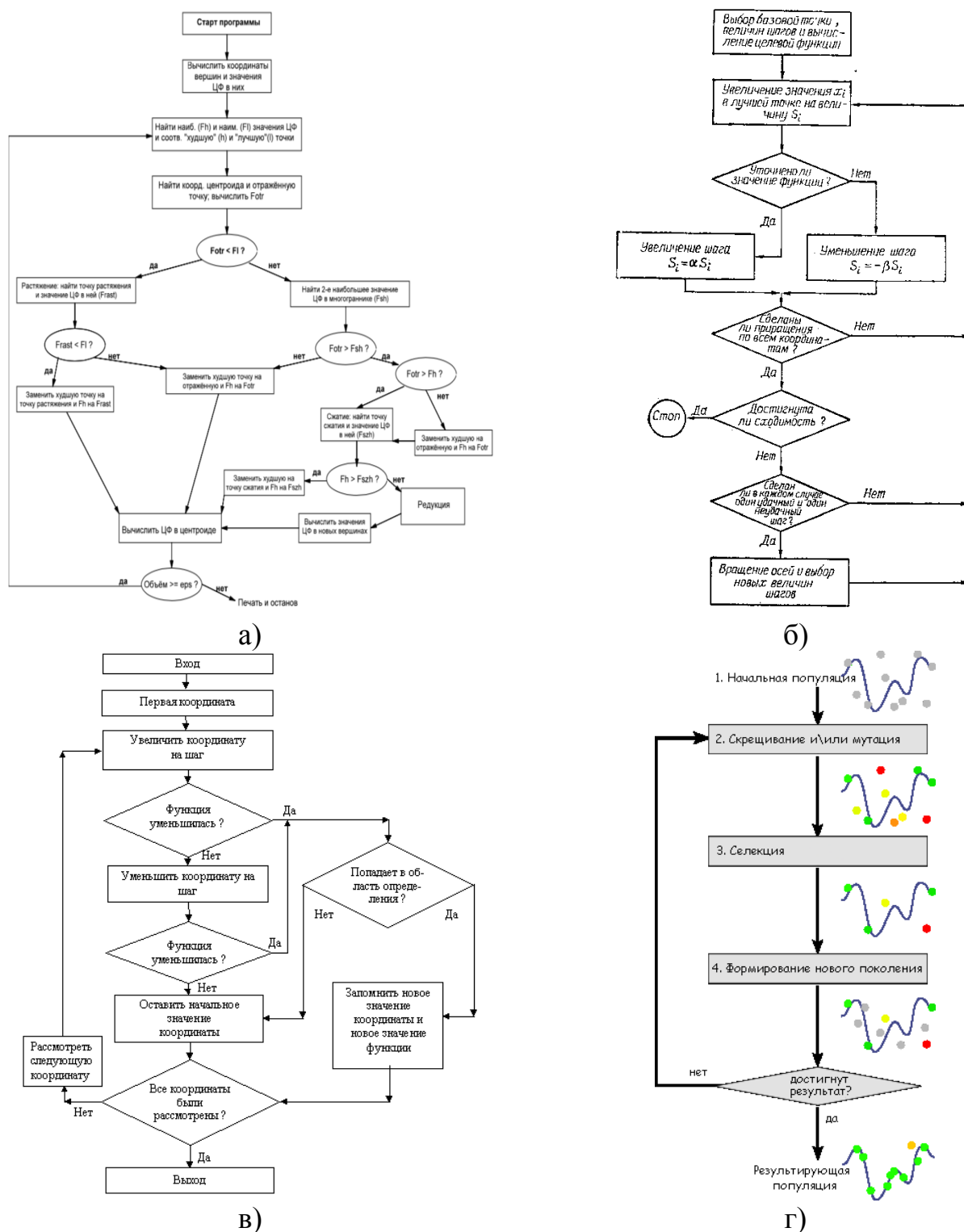


Рисунок 1.13 – Блок-схема реализации нелинейных алгоритмов

Работой, объединяющей и синхронизирующей исследования в области оптимального проектирования решетчатых систем является совместный труд В.Н. Шимановского, В.Н. Гордеева и М.Л. Гринберга [97], в которой объединены эффективные технологии применения ЭВМ к оптимальному проектированию, уделено значительное внимание к оценке металлоемкости, трудоемкости

изготовления и монтажа стержневых покрытий, а также энергоемкости конструктивной формы стержневых систем. Предлагаемые в работе методы ориентированы на средства автоматизированного проектирования в режиме диалога.

Некоторое внимание следует уделить работам J. Holland, основанным на создании генетического алгоритма оптимизации (Рисунок 1.13, г), основанного на представлении упрощенного описания эволюционных перестроек в природных популяциях микроорганизмов (набор хромосом и соответствующих генов) [94]. Такую методику применяли к строительным конструкциям начиная с 1990-х годов. Однако ценности в применении к данной работе генетический метод оптимизации не представляет в связи с недостаточным количеством апробации в области стержневых систем, и, как следствие сложности реализации в применении к ним.

На основе анализа выше представленных источников, основными классическими, **варьируемыми параметрами** принимаются: размеры ячейки ( $a, b$ ); число панелей ( $m, n$ ) (граней, ребер, колец); высоту стержневого набора ( $h$ ); стрелу подъема покрытия ( $f$ ). **Заданными считаются:** тип конструкции; генеральные размеры в плане; характер опирания; уровень нагрузки; характеристики материала и сортамента профилей.

Помимо вышеперечисленных работ, вопросами исследования оптимизации большепролетных конструкций также занимались Е.В. Горохов, Я.В. Назим, В.Ф. Муцанов [24], Н.Р. Жук, С.В. Колесниченко [41], В.Ю. Алпатов [2], А.В. Андронников [3], А.В. Гинзбург [22], А.А. Василькин [144, 146], И.В. Кучеренко [46], И.Н. Серпик [140, 141], Г. Реклейтис, А. Рейвирдан, К. Рэгсдел [71], А.Г. Тамразян [85], Е.В. Яньков [99] М. Kociecki, Н. Adeli [128, 129], W. Zhang, K. Kawaguchi, M. Wu [147], N. Petrovic, N. Kostic [136], J. Dzwierzynska [111], M. Kurniawan, A. Adha [130], C. Imediegwu, R. Murphy, R. Hewson [125], Neeraja D., P.S. Kumar [134]. В вышеперечисленных работах раскрыты вопросы оптимизации большепролетных конструкций на типовых планах согласно действующим нормам проектирования с различными варьируемыми параметрами. Однако,

вопросы оптимизации конструкций на нетиповом плане с учетом уточненных моделей структурных покрытий, не затрагивались.

Согласно последнему анализу во всемирной наукометрической базе SCOPUS на рисунке 1.14 представлена всемирная актуальность выбранной тематики работ. Следует отметить, что в период с 2009 по 2020 год наблюдается тенденция роста научного общества к выбранной тематике работы. В частности, лидирует в данной области исследования ученые Китайской Народной Республики и Соединенных Штатов Америки (Рисунок 1.15).

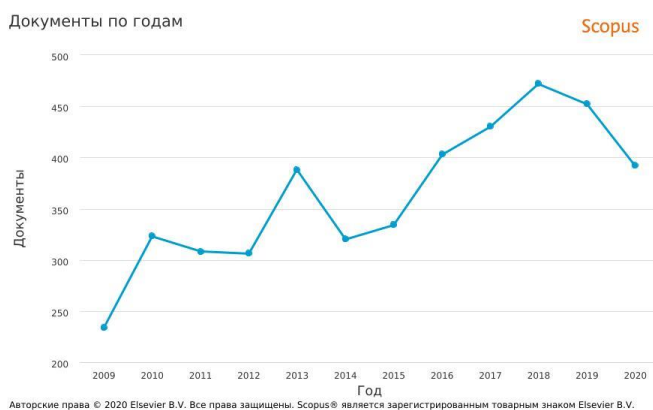


Рисунок 1.14 – Актуальность выбранной области исследований

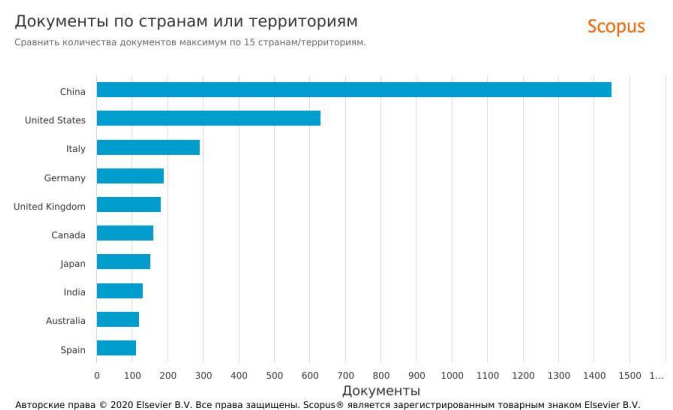


Рисунок 1.15 – Лидирующие страны в выбранной области исследования

## 1.6. Цели и задачи исследования

На основе результатов критического анализа источников, представленного в I главе работы, сформулированы:

- **цель исследования** – разработка оптимальных конструктивных форм структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах с учетом значимых параметров проектирования и уточненной несущей способности центрально-сжатых стержней, обеспечивающих возможность использования типовых конструктивных элементов;

- **объект исследования** – напряженно-деформированное состояние элементов и конструктивная форма структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах;

- **предмет исследования** – общие закономерности изменения основных параметров напряженно-деформированного состояния элементов и

конструктивной формы структурных покрытий на нетиповых планах в зависимости от изменения значимых факторов (основных параметров проектирования).

Поставленная цель исследования достигается путем решения основных **задач исследования:**

1. Выполнить критический анализ конструктивных решений, методов расчета и оптимального проектирования структурных покрытий.
2. Обосновать основные теоретические и экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния, устойчивости центрально-сжатых стержней и оптимального проектирования структурных покрытий.
3. Выполнить теоретическую и экспериментальную оценку влияния конструктивного решения узловых соединений на устойчивость центрально сжатых стержней структурных покрытий.
4. Разработать алгоритм оптимального проектирования структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах с учетом уточненной оценки несущей способности центрально-сжатых стержней и возможности расширения конструктивной формы в виде пологих стержневых оболочек положительной гауссовой кривизны.
5. Оценить влияние податливости опор на напряженно-деформированное состояние конструкции структурного покрытия на нетиповом плане.
6. Предложить рациональные подходы к регулированию параметров напряженно-деформированного состояния конструкции покрытия, обеспечивающие возможность использования типовых конструктивных элементов (стержней, соединительных элементов) при перекрытии прямоугольных планов с нетиповым соотношением сторон.

На основании сформированной цели и задач исследования на рисунке 1.16 представлена блок-схема в виде структурно-логической схемы проведения теоретических и экспериментальных исследований.

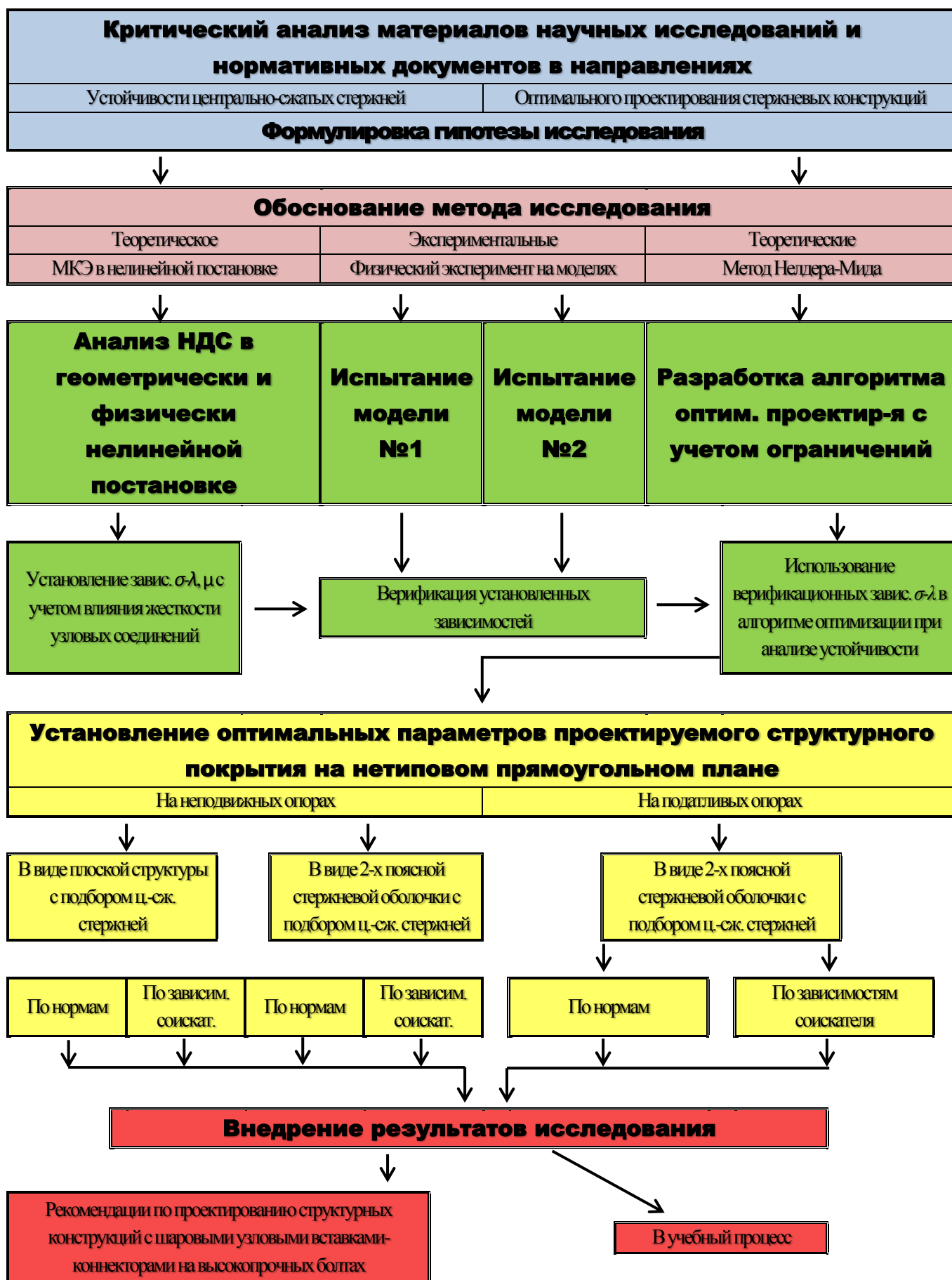


Рисунок 1.16 – Блок-схема теоретических и экспериментальных исследований

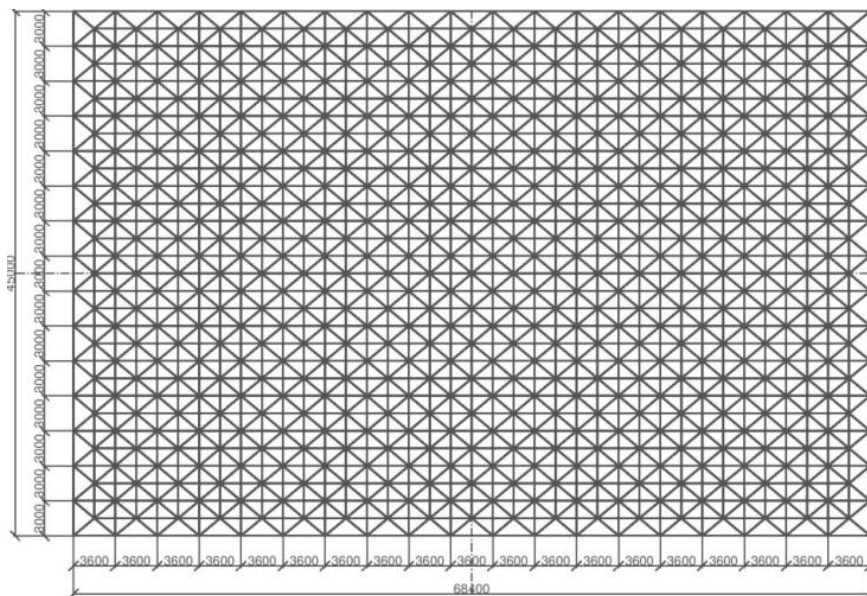


## «РАЗДЕЛ II. ОБОСНОВАНИЕ ПЛАНИРУЕМЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ»

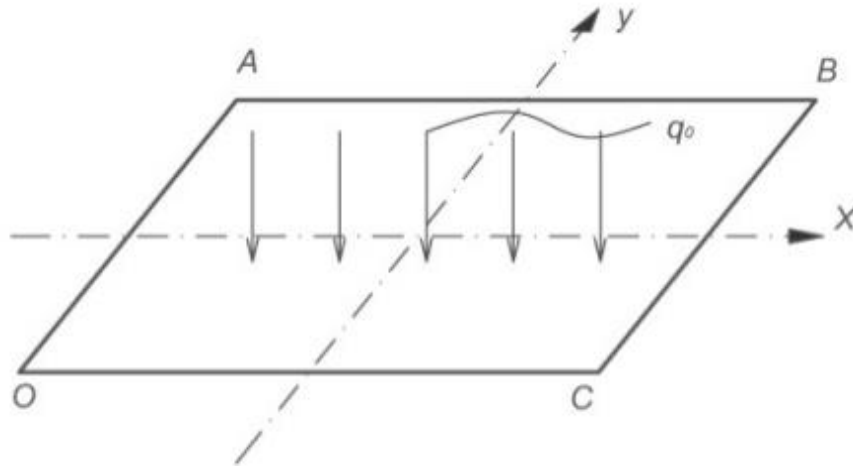
2.1. Обоснование использования метода конечных элементов в решении задач устойчивости и общего анализа напряжённо-деформированного состояния.

Наиболее всеобъемлющие принципы компоновки, расчета и проектирования структурных конструкций покрытий на типовых планах, как было отмечено в I главе, приведенные в ранее указанных работах, и относятся к объектам, реализуемым либо на квадратном плане, либо близком к ним (с соотношением сторон не более 1,5:1).

Особенности данной работы, которые, в первую очередь, предусматривают исследование поведения конструкций на нетиповых планах, а также цели и задачи, сформулированные в конце I-й главы, обуславливают применение соответствующих методов исследования. Одной из основных таких особенностей является более подробное изучение влияния соотношения сторон плана покрытия (с соотношением сторон более 1.5:1), выраженное в виде безразмерных геометрических параметров проектируемой структурной конструкции, получаемых на основе рассмотрения основных уравнений теории изгиба тонких пластин, на параметры напряженно-деформированного состояния (НДС).



а) – рассчитываемая структурная конструкция;



б) – эквивалентная плита

Рисунок 2.1 – Исследуемое структурное покрытие (68,4x45 м)

Для получения системы безразмерных параметров рассмотрим прямоугольную тонкую пластину с соотношением сторон  $a:b$ , толщиной  $t$ , шарнирно закрепленной по контуру и нагруженной равномерно распределенной нагрузкой  $q_0$  (Рисунок 2.1, б). Как известно, в основе решения подобных задач лежит уравнение Софи-Жермен:

$$\nabla^4 w = \frac{d^4 w}{dx^4} + 2 \frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} + \frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{q(x, y)}{D} \quad (2.1)$$

Для решения уравнения зададимся функцией прогиба:

$$w = w_0 \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b} \quad (2.2)$$

Предлагаемая функция прогиба удовлетворяет условиям на контуре соответствующим шарнирно-неподвижному закреплению ( $w=0$ ;  $w' \neq 0$ ).

Подставим 4-е производные от функции прогиба в уравнение (2.1):

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{\pi^4 W_0}{16a^4} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

$$\frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{\pi^4 W_0}{16b^4} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

$$\frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} = \frac{\pi^4 W_0}{16a^2 b^2} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

$$\frac{d^4 w}{dy^2 dx^2} = \frac{\pi^4 W_0}{16a^2 b^2} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

Запишем уравнение в развернутом виде:

$$\nabla^4 w = \frac{\pi^4 W_0}{16a^4} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b} + 2 \left( \frac{\pi^4 W_0}{16a^2 b^2} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b} \right) + \frac{\pi^4 W_0}{16b^4} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b} \quad (2.3)$$

и из его решения получим значение постоянной  $w_0$  (2.4). Для центра покрытия, где прогиб имеет максимальное значение (при  $x=0$ ;  $y=0$ ), получаем упрощенное выражение:

$$w_0 = \frac{16q_0}{\pi^4 D} \left( \frac{a^4 b^4}{(a^2 + b^2)^2} \right) \quad (2.4)$$

Анализируя полученное выражение можно указать, что прогиб в центре покрытия линейно зависит от величин  $q_0$  и  $D$  и нелинейно от геометрического параметра  $\bar{S}_1$ :

$$\bar{S}_1 = \frac{a^4 b^4}{(a^2 + b^2)^2} \quad (2.5a)$$

Используя 2-е производные от функции прогиба:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{\pi^2 W_0}{4a^2} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

$$\frac{d^2 w}{dy^2} = -\frac{\pi^2 W_0}{4ab^2} \cdot \cos \frac{\pi x}{2a} \cdot \cos \frac{\pi y}{2b};$$

получим выражения для расчета изгибающих моментов  $M_x$  и  $M_y$  в общем виде:

$$M_x(x, y) = -D \left( \frac{d^2}{dx^2} W(x, y) + \mu \frac{d^2}{dy^2} W(x, y) \right);$$

$$M_y(x, y) = -D \left( \frac{d^2}{dy^2} W(x, y) + \mu \frac{d^2}{dx^2} W(x, y) \right);$$

преобразованные для центра покрытия (при  $x=0$ ;  $y=0$ ):

$$M_x = D \frac{\pi^2 W_0}{4} \left( \frac{1}{a^2} + \frac{\mu}{b^2} \right) = \frac{4q_0}{\pi^2} \cdot \frac{(b^2 + \mu a^2)(a^2 + b^2)}{a^6 b^6};$$

$$M_y = D \frac{\pi^2 W_0}{4} \left( \frac{1}{b^2} + \frac{\mu}{a^2} \right) = \frac{4q_0}{\pi^2} \cdot \frac{(a^2 + \mu b^2)(a^2 + b^2)}{a^6 b^6};$$

В формулах (2.5б) и (2.5в) приведены значения геометрических параметров, связанных, соответственно, с изгибающими моментами  $M_x$  и  $M_y$ , вычисленными для центра покрытия.

$$\bar{S}_2 = \frac{(b^2 + \mu a^2)(a^2 + b^2)^2}{a^6 b^6} \quad (2.5б)$$

$$\bar{S}_3 = \frac{(a^2 + \mu b^2)(a^2 + b^2)^2}{a^6 b^6} \quad (2.5в)$$

**Примечание:** при действии равномерно распределенной нагрузки значения поперечных сил  $Q_x$  и  $Q_y$ , а также крутящего момента  $M_{xy}$  равны нулю.

Однако стоит отметить, что при аналитическом решении задачи влияния безразмерных параметров  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  на показатели НДС проектируемой конструкции расчёт сводится к нахождению изгибающих моментов в эквивалентной плите, но применение такого принципа расчёта имеет несколько существенных ограничений:

*а) глобального характера:*

- отсутствие возможности аналитического расчёта систем со сложной конфигурацией в плане и несимметричными опорными закреплениями;
- неравномерно распределёнными нагрузками, плохо поддающимися аналитическому описанию;

– учёт переменной кривизны конструкции при преобразовании тонкой пластинки в тонкую пологую оболочку.

*б) локального характера:*

– учёт различий в действительной работе элементов структурной плиты – центрально-сжатых и центрально-растянутых элементы;

– отсутствие дискретного отображения стержневых элементов в расчётной схеме, а, следовательно, возможности последующего анализа устойчивости отдельных сжатых элементов;

– отсутствие возможности оценить влияние конструктивного решения узловых соединений на напряжённо-деформированное состояние покрытия.

Учсть вышеперечисленные факторы и, таким образом, исследовать максимально приближённую к реалиям расчётную схему, включающую в себя учёт всех перечисленных выше факторов, позволяет использование метода конечных элементов (МКЭ).

### 2.1.1. Теоретическая основа возможности решения задачи устойчивости МКЭ

В данной работе используется статический метод исследования устойчивости (*для возможного критического состояния записывается уравнение возможного вида деформированной оси элемента*). При исследовании статическим методом, рассматриваемой системе задается отклоненная форма равновесия (допускаемая имеющимися связями), совпадающая с новой ожидаемой формой системы после потери устойчивости, и определяются значения нагрузок, способных удержать систему в этой новой форме равновесия [44-49].

Считается, что отклоненная форма равновесия бесконечно близка к исходной и координаты граничных условий принимаются по исходному состоянию. Определённые на основе таких предпосылок нагрузки считаются критическими. Нагрузки находятся по формуле Эйлера (2.6):

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (2.6)$$

Они соответствуют безразличному равновесию между исследуемым состоянием и бесконечно близким к нему.

Говоря о решении задач устойчивости для стержня, находящегося в составе стержневой системы, для которого отсутствуют идеализированные закрепления, принятые в решении Эйлера, наиболее часто используемым является метод *перемещений*, где анализ устойчивости сводится к выполнению условия:

$$r \cdot Z = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.7)$$

Из решения этой задачи получаем величину критической силы для стержня, относительно которого составляется трансцендентное уравнение, получаемое при раскрытии детерминанта:

$$Det = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{vmatrix} = 0 \quad (2.8)$$

Полученное решение (2.8) является теоретической основой для уравнения МКЭ, которое выражает эту запись в матричной форме и имеет следующий вид:

$$\alpha_\lambda(v, w) = \int_0^L (EFv'_x w'_x + EJv'_z w'_z) dx + \lambda \int_0^L Nv'_z w'_z dx = 0 \quad (2.9)$$

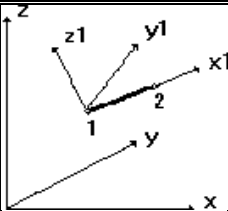
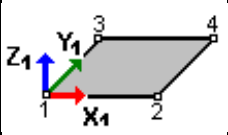
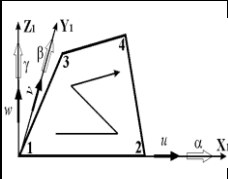
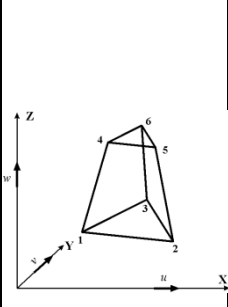
где  $\lambda$  – наименьшее положительное число (коэффициент запаса), при котором функционал перестаёт быть положительно определённым.

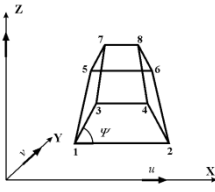
Изложенный подход в рамках МКЭ широко используется практически во всех универсальных КЭ–комплексах и, учитывая универсальность алгоритма МКЭ, он используется не только при анализе стержневых систем, но и систем, сформированных из оболочечных и пластинчатых КЭ. Для рассматриваемой задачи основными преимуществами МКЭ, который предполагается использовать

в качестве основного инструмента, для анализа НДС исследуемой конструкции, являются:

- возможность наиболее простого варьирования геометрических размеров в плане при проведении численного эксперимента;
- возможность наиболее простого учета различных граничных условий на контуре исследуемой пластины покрытия;
- непосредственный учет дискретности системы, в которой информация о НДС представляется для каждого стержня-элемента в отдельности;
- возможность использования наиболее простого способа в задании различных схем загрузки конструкции.

Таблица 2.1 – Описание используемых КЭ

| № п/п | ПК                   | Эскиз конечного элемента  | Описание типа КЭ   | Плоск-ть распол. | Степени свободы   |
|-------|----------------------|---|--|------------------|---|
| 1     | 1                    | 2   | 3  | 4                | 5   |
| 1     | SCAD Office 11.3.5.1 |  | Тип КЭ № 310 – универсальный стержень (с учетом геометрич. нелинейности)   | Произв.          | X, Y, Z, U <sub>x</sub> , U <sub>y</sub> , U <sub>z</sub> |
| 2     | SCAD Office 11.3.5.1 |  | Тип КЭ № 344 – 4-х угольный КЭ оболочки (с учетом геометрич. нелинейности)   | Произв.          | X, Y, Z, U <sub>x</sub> , U <sub>y</sub> , U <sub>z</sub> |
| 3     | ЛИРА-САПР 2017       |  | Тип КЭ № 44 – 4-х угольный КЭ оболочки; Тип КЭ № 244 – физически нелинейный 4-х угольный КЭ оболочки; Тип КЭ № 344 – геометрически нелинейный 4-х угольный КЭ оболочки;  | Произв.          | X, Y, Z, U <sub>x</sub> , U <sub>y</sub> , U <sub>z</sub> |
| 4     | ЛИРА-САПР 2017       |  | Тип КЭ № 34 – Универсальный пространственный шестиузловой изопараметрический КЭ– физически нелинейный 4-х угольный КЭ оболочки; Тип КЭ № 234 – Физически нелинейный универсальный пространственный шестиузловой изопараметрический КЭ– физически нелинейный 4-х угольный КЭ оболочки; Тип КЭ № 334 – Геометрически нелинейный универсальный пространственный | Произв.          | X, Y, Z, U <sub>x</sub> , U <sub>y</sub> , U <sub>z</sub> |

| № п/п | ПК             | Эскиз конечного элемента  | Описание типа КЭ   | Плоск-ть распол. | Степени свободы           |
|-------|----------------|---|--|------------------|---------------------------|
| 1     | 1              | 2   | 3  | 4                | 5                         |
|       |                |   | восьмиузловой изопараметрический КЭ– физически нелинейный 4-х угольный КЭ оболочки;  |                  |                           |
| 5     | ЛИРА-САПР 2017 |  | Тип КЭ № 36 – Универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ– физически нелинейный 4-х угольный КЭ оболочки; Тип КЭ № 236 – Физически нелинейный универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ– физически нелинейный 4-х угольный КЭ оболочки; Тип КЭ № 336 – Геометрически нелинейный универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ– физически нелинейный 4-х угольный КЭ оболочки; | Произв.          | X, Y, Z,<br>Ux, Uy,<br>Uz |

В качестве аппарата реализации КЭ расчета предполагается использовать универсальные программные расчетно-вычислительные комплексы семейства ЛИРА-САПР 2019. Используемые при формировании расчетных схем КЭ представлены в таблице 2.1 [42, 43].

#### 2.1.2. Обоснование расчетной схемы исследования устойчивости стержня методом конечных элементов

Обоснование рациональности возможного использования для анализа устойчивости стержня методом конечных элементов рассмотрим на решении задачи одиночного шарнирно-опертого стержня при упругой и упруго-пластической стадии работы материала. При решении задачи численным методом используется универсальный расчетный комплекс семейства ЛИРА-САПР [42, 43, 23].

Применимость такого подхода рассмотрим на тестовом примере продольного изгиба стержневого элемента, выполненного из круглой трубы сечением 48x3 по ГОСТ Р 58064-2018 [33] «Трубы стальные сварные для строительных конструкций» со следующими характеристиками:



- $A=4,24 \text{ см}^2$ ;
- $I_x=I_y=10,78 \text{ см}^4$ ;
- $i_x=i_y=1,59 \text{ см}$ .
- $l=191 \text{ см}$  (для упругого расчета)  $\rightarrow \lambda=120$ ;
- $l=127,4 \text{ см}$  (для упруго-пластического)  $\rightarrow \lambda=80$ ;
- $\alpha=3100$  (для Ст2, Ст3);
- $\beta=11,4$

Для исследования потери устойчивости в упругой стадии работы материала воспользуемся классическим решением задачи формулой Эйлера (2.6):

$$P_{кр} = \frac{3,14^2 \cdot 20600 \text{ (кН/см}^2\text{)} \cdot 10,78 \text{ (см}^4\text{)}}{159 \text{ (см}^2\text{)}} = 86,61 \text{ (кН)}$$

Перейдем к критическим напряжениям:

$$\sigma_{кр} = \frac{P_{кр}}{A} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{кр} = \frac{86,61 \text{ (кН)}}{4,24 \text{ (см}^2\text{)}} = 20,42 \text{ кН/см}^2$$

Для исследования потери устойчивости в упруго-пластической стадии работы материала воспользуемся классическим решением задачи формулой Энгессера-Ясинского:

$$\sigma_{кр} = \alpha - \beta \lambda \quad (2.11)$$

$$\sigma_{кр} = 3100 - 11,4 \cdot 80 \cdot 10^{-2} = 21,88 \text{ (кН/см}^2\text{)};$$

Перейдем к критической нагрузке:

$$P_{кр} = \sigma_{кр} A \quad (2.12)$$

$$P_{кр} = \sigma_{кр} A = 21,88 \text{ (кН/см}^2\text{)} \cdot 4,24 \text{ см}^2 = 92,77 \text{ кН}$$

Далее, от моделируем исследуемый стержень в программном комплексе ЛИРА-САПР (Рисунок 2.2).

При создании расчетной схемы выполнялись следующие операции:

- в качестве расчетной модели принимается труба 48х3, с геометрической длиной 127,4 см (со значением гибкости  $\lambda=80$ );
- моделирование выполнялось объемными элементами, согласно геометрической длине стержня (без моделирования узлового соединения);
- моделировался стержень с помощью КЭ 236 – физически нелинейный пространственный 8-узловой изопараметрический КЭ (для трубы) и КЭ 242 – физически нелинейный универсальный треугольный КЭ оболочки (для заглушки);
- сетка дробления элемента равняется 12.74х7.5 мм (100 элементов по высоте и 20 элементов по контуру элемента);
- нагрузка на стержень принята на 30% выше от полученной критической нагрузки по формуле Энгессера-Ясинского.

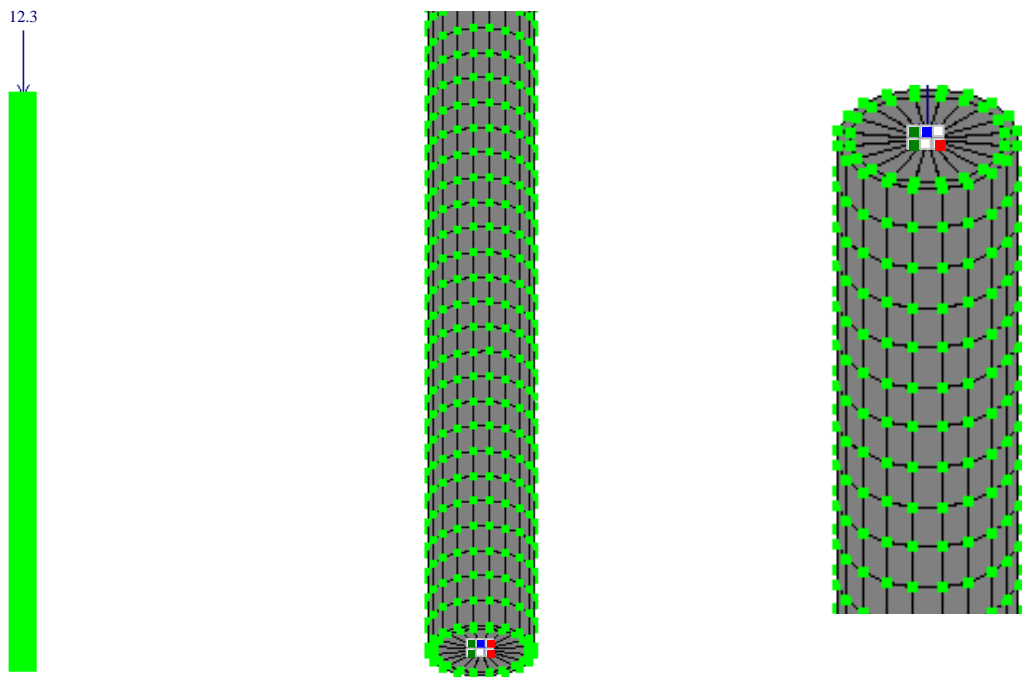


Рисунок 2.2 – Расчетная схема центрально-сжатого стержня в ПК ЛИРА-САПР

Учитывая, что расчетная схема стержня, представленного на рисунке 2.2, является центрально-сжатым стержнем с шарнирно-закрепленными концами, то теоретический анализ устойчивости стержня  $\lambda=80$  выполнен с использованием

формулы Энгессера-Ясинского (2.11). Для сопоставимости результатов расчета напряжения в эквивалентном стержне определялись с использованием формулы (2.12) используя в качестве значения  $P_{кр}$  данные расчета ПК ЛИРА-САПР.

Сравнение результатов расчетов аналитическими и численным методами для стержня с гибкостью, представлены ниже, в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Сравнение результатов расчета

| $\lambda$ | Результаты расчета                  | Аналитические решения | Численное решение (ЛИРА-САПР 2019 R1) | Разность между столбцами 3 и 4 (%) |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| 1         | 2                                   | 3                     | 4                                     | 5                                  |
| 80        | $\sigma_{кр}$ (кН/см <sup>2</sup> ) | 21,88                 | 21,75                                 | 0,6                                |
|           | $N_{кр}$ (кН)                       | 92,77                 | 92,25                                 |                                    |
| 100       | $\sigma_{кр}$ (кН/см <sup>2</sup> ) | 20,42                 | 20,69                                 | 1,3                                |
|           | $N_{кр}$ (кН)                       | 86,81                 | 87,75                                 |                                    |

В качестве основных особенностей моделирования стержня-оболочки следует отметить, что сформированная расчетная схема в виде пространственного стержня-оболочки подтверждает свою корректность и возможность дальнейшего использования при численном анализе устойчивости стержней с учетом влияния узловых закреплений. Также, контроль НДС при пошаговом приложении нагрузки в расчетной модели, позволяет более корректно учесть изменение геометрии стержня в процессе его деформирования, и тем самым, уточнить результаты расчета.

## 2.2. План и методика проведения физического эксперимента по устойчивости центрально-сжатых стержней

В качестве подхода к исследованию проблемы устойчивости центрально-сжатых элементов конструкции в части верификации, рассматриваемых в численных исследованиях расчетных схем принято использовать физическое моделирование. Исследуемая физическая модель создается с соблюдением принципов геометрического и физического подобия и имеет ту же качественную природу, что и моделируемый объект [30, 34, 86].

В связи с наличием регламентирующего сортамента, как стержней, так и узловых вставок-коннекторов, масштабы-индикаторы (*EI, EF, геом. размеры*) планируется принимать в масштабе 1:1.

В основу физической модели положен фрагмент структурной плиты (ячейка структурного покрытия). Благодаря объединению нескольких стержней в узловой вставке-коннекторе, в модели максимально полно отражается действительная работа всех элементов покрытия, и в особенности, полно моделируется податливость узловых соединений, что в конечном итоге позволит уточнить значения несущей способности центрально-сжатых элементов структурной конструкции из условия устойчивости с учётом влияния конструктивных особенностей узловых соединений.

Для анализа физической модели и подбора необходимой аппаратуры, на основе данных конечно-элементных расчетов, приведенных в разделе 2.1.2, проведем подбор измерительного оборудования и нагрузочных устройств. Данные КЭ-анализа модели позволят оценить ожидаемый уровень деформаций и напряжений конструкции, что в свою очередь послужит основой для целенаправленного назначения регистрирующих приборов и оборудования, выбор которых должен гарантировать проведение измерений с требуемой точностью.

Нагружение конструкции наиболее логично осуществлять с использованием гидравлических домкратов в силу следующих причин:

- обеспечения «следающего» характера действующей нагрузки;
- возможности плавного увеличения нагрузки при обеспечении фиксации на необходимых шагах загрузки (пошаговое приложение нагрузки);
- возможности резкого сброса нагрузки в случае необходимости.

В качестве основного измерительного оборудования применяется:

- для измерения относительных деформаций [86] - первичных преобразователей в виде тензорезисторов на бумажной основе с базой  $l=20$  мм и номинальным сопротивлением  $R=200$  Ом (Рисунок 2.3, а);
- для измерения линейных перемещений – индикаторов часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм (Рисунок 2.3, б);

- для регистрации изменения омического сопротивления первичных преобразователей – ОВЕН МВ110-224. 1ТД (Рисунок 2.3, в);
- для опроса, визуализации и архивирования параметров по полученным данным – SoftLogic–система MasterSCADA 3.xDemo [64].

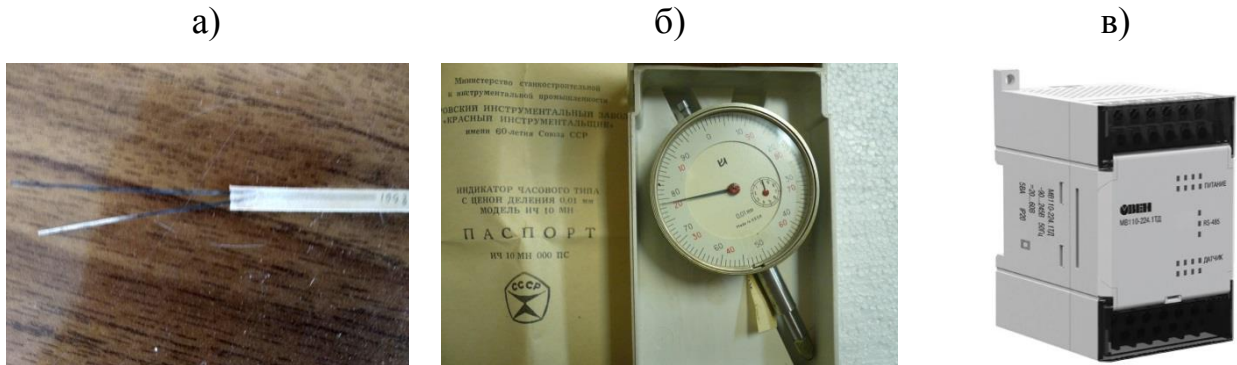


Рисунок 2.3 – Общий вид измерительного оборудования: а – проволочный петлевой тензорезистор, б – индикатор часового типа ИЧ-10, в – прибор для регистрации данных первичных преобразователей ОВЕН МВ110-224. 1ТД

Обоснование точности используемого к применению оборудования приведено в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Обоснование возможности применения измерительного оборудования

| № п/п | Фиксируемый показатель             | Тип используемого оборудования                          | Цена деления прибора    | Погрешность измерения |
|-------|------------------------------------|---|-------------------------|-----------------------|
| 1.    | Нагрузка                           | Гидродомкрат ДГ-100, ДГ-20                              | 1 кгс/см <sup>2</sup> - | -                     |
| 2.    | Относительная деформация           | Тензорезистор КФ5П1-20-200-А-12-С1                      | -                       | ±1 Ом                 |
| 3.    | Перемещение                        | Индикатор часового типа ИЧ-10, прогибомер ПАО-6         | 0,01 мм                 | От 15 до 20 мкм       |
| 4.    | Изменение омического сопротивления | Модуль ввода сигналов тензодатчиков ОВЕН МВ110-224.4.ТД | 0,01 МПа                | ±0.05 %               |

2.3. Обоснование используемого метода оптимизации геометрической формы структурного покрытия

Проведенный критический анализ методов оптимального проектирования проектных решений строительных конструкций позволил зафиксировать как значительное количество применяемых методов, так и присущие им преимущества и недостатки. Учитывая особенность планируемых исследований, заключающихся в оптимизации геометрической формы структурного покрытия на нетиповом прямоугольном плане по критерию минимума массы, сформулируем основные особенности решаемой задачи:

- дискретность оптимизируемой модели;
- использование численных методов для реализации процедуры оптимизации;
- наличие значительного количества управляющих параметров;

Сформулированные требования в наиболее полной мере отвечает один из наиболее широко используемых и распространенных методов нелинейного программирования - метод деформированного многогранника в наиболее часто применяемой реализации в виде метода Нелдера-Мида (процедура поиска по симплексу, относящаяся к методам безусловной оптимизации нулевого порядка) [94, 135].

Решение сформулированной выше задачи оптимизации с использованием метода Нелдера-Мида предполагает целенаправленный выбор варьируемых параметров, которые оказывают значительное влияние на НДС конструкции, а следовательно и на её материалоемкость и эффективность принимаемых проектных решений. К основным его достоинствам следует отнести:

- метод нулевого порядка, использующий только значение целевой функции, легко применяется к негладким и зашумленным функциям, тем самым не накладывая ограничения на них;
- отсутствие теории сходимости. Алгоритм может расходиться даже на гладких функциях;
- не зависит от количества управляемых параметров;

– контроль информации, получаемой на каждой итерации при поиске оптимума;

В рамках предварительно выполненных исследований, для расчетной схемы, приведенной на рисунке 2.2, была выполнена оценка значимости отдельных проектных переменных, которые в дальнейшем могут рассматриваться в качестве параметров оптимизируемых переменных. Установленные зависимости влияния упомянутых проектных переменных на основные характеристики напряженно-деформированного состояния элементов покрытия отражены в виде зависимостей приведенных на рисунках 2.4-2.7 [27, 74, 75].

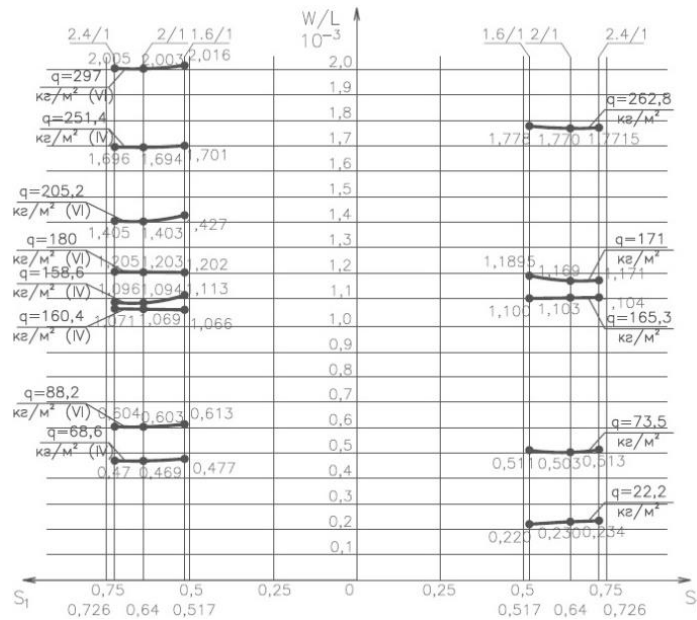


Рисунок 2.4 – Зависимость относительного прогиба ( $W/L$ ) и соотношения сторон в плане ( $S_1$ )

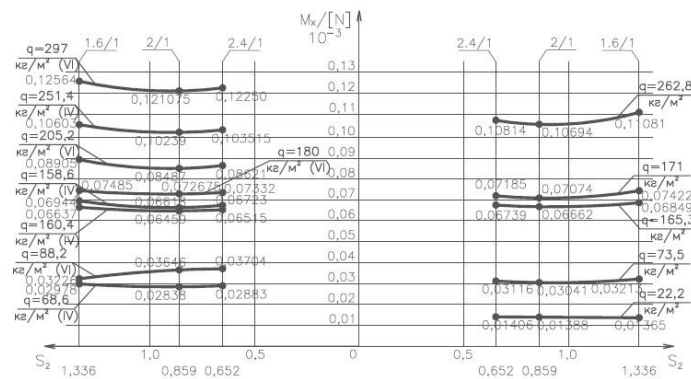


Рисунок 2.5 – Зависимость относительного момента ( $M_x/N$ ) и соотношения сторон в плане ( $S_2$ )

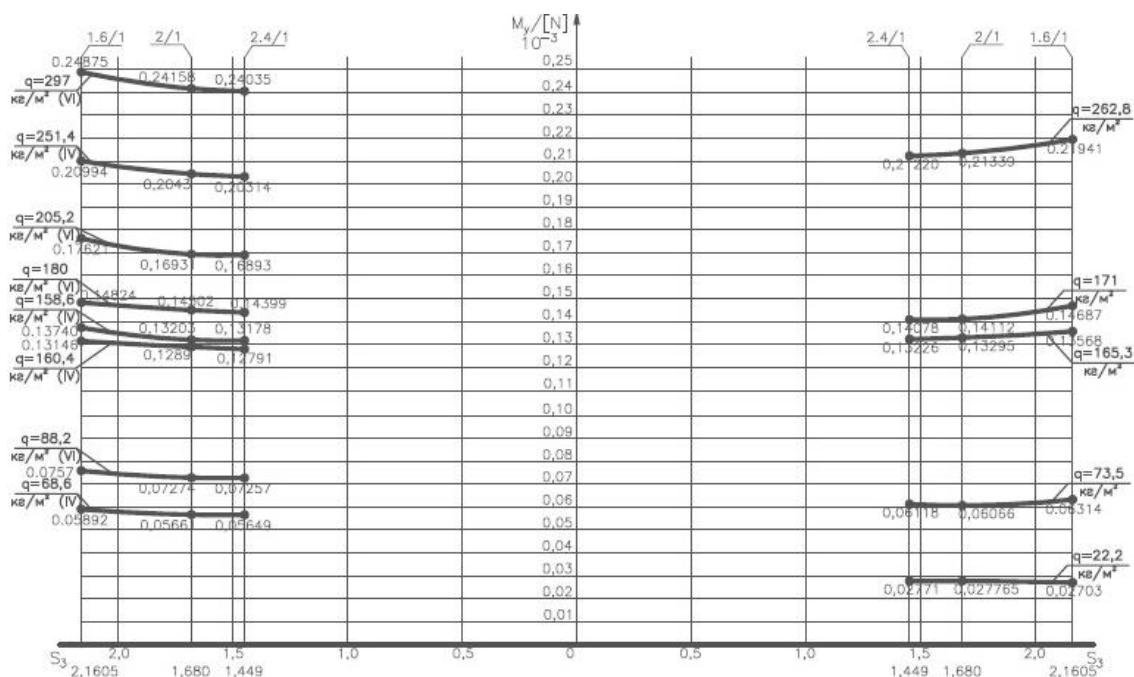


Рисунок 2.6 – Зависимость относительного момента ( $M_y/N$ ) и соотношения сторон в плане ( $S_3$ )

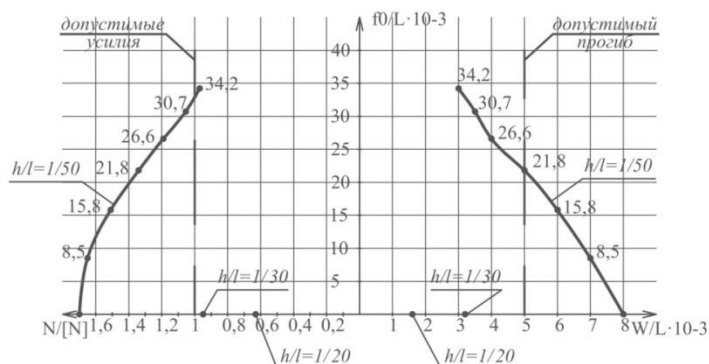


Рисунок 2.7 – Зависимость относительной стрелы обратного выгиба ( $f_0/L$ ) и относительного прогиба ( $W/L$ )

Анализ зависимостей, приведенных на рисунках 2.4-2.7 позволяет сделать вывод о значимости переменных проектирования  $q^*$ ,  $S1-S3$  ( $a/b$ ),  $f/l$ ,  $h/l$  и дальнейшем их использовании при проведении исследований по оптимизации конструктивной формы.

#### 2.4. Выводы по результатам 2-й главы

Проведенное обоснование методов, планируемых к применению в ходе численных и экспериментальных исследований, позволяют сделать следующие выводы:



1. Наиболее рациональным для уточнения несущей способности центрально-сжатых стержней из условия устойчивости и с учетом конструктивного оформления узлов пространственной работы стержневых элементов выполненных из круглых труб является МКЭ в форме метода перемещений. Предварительные расчеты показывают, что уточнение несущей способности стержней за счет детализации расчетной схемы стержня позволяют уточнить его несущую способность в пределах 10-12% по сравнению с известными классическими решениями.

2. Для проведения экспериментальных исследований на физической модели ячейки структурного покрытия наиболее рациональным рассматривается использование:

– для регистрации относительных деформаций элементов: в качестве первичных преобразователей – проволочные петлевые тензорезисторы с базой  $l = 20$  мм и номинальным омическим сопротивлением  $R = 200$  Ом, вторичного преобразователя – ОВЕН МВ110-224. 1ТД;

– для регистрации линейных перемещений элементов: индикаторов часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм;

Применение указанных приборов позволяет осуществить регистрацию параметров НДС с погрешностью не превышающей  $\pm 5\%$ .

3. Для решения планируемой задачи оптимизации геометрической формы первоначально плоского структурного покрытия на нетиповом плане наиболее предпочтительным является метод Нелдер-Мида в силу высокой степени апробированности в области оптимального проектирования строительных конструкций, простоте реализации в программных кодах и хорошей сходимости получаемых результатов.

4. Как показал предварительно выполненный анализ, наиболее эффективными управляющими параметрами оптимизации для получения оптимального решения являются:  $q^*$ ,  $S1-S3 (a/b)$ ,  $f/l$ ,  $h/l$ .

«РАЗДЕЛ III. ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ  
УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫХ  
СТЕРЖНЕЙ»

3.1. Исходные данные и методика моделирования при исследовании устойчивости центрально-сжатых стержней

Для исследования критической силы в вопросах устойчивости центрально-сжатых стержней структурного покрытия варьируемыми параметрами в исследовании выступают размеры конструкции узлового соединения и гибкость стержня (таблица 3.1).

В основу третьего раздела работы положены, как было сказано во II-м разделе, вопросы устойчивости центрально-сжатых стержней. Инструментом для реализации задачи в конечно-элементной постановке является программный комплекс семейства ЛИРА-САПР.

Сразу следует отметить, что методика исследования потери устойчивости подобрана на основе подходов к разработке конечно-элементной модели. Так, при выборе типов конечных элементов, представленных во II-м разделе, конечный выбор пал на моделирование оболочками. При создании модели объемными элементами в физически нелинейной постановке задачи исследования, полученная критическая сила оказалась выше на 12%, нежели для оболочечной модели, рассчитываемой в геометрически и физически нелинейной постановке, которая показала наиболее близкую сходимость с результатами, полученными на основе нормативных документов и аналитических исследований.

Таблица 3.1 – Исследуемые сечения элементов и соответствующие гибкости

| № п/п | Сечение труб, мм | $\lambda$ | ½ Диаметра коннектора ( $l_k$ ), мм | Длина выступающей части болта ( $l_6$ ), мм | Толщина заглушки ( $t_3$ ), мм | Длина трубы ( $l_T$ ), мм |
|-------|------------------|-----------|-------------------------------------|---|--------------------------------|---------------------------|
| 1     | 1                | 2         | 3                                   | 4   | 5                              | 6                         |
| 1     | Ø48x3            | 50        | 60                                  | 24  | 20                             | 2022                      |
| 2     | Ø48x3            | 60        | 60                                  | 24  | 20                             | 2022                      |
| 3     | Ø48x3            | 70        | 60                                  | 24  | 20                             | 2022                      |
| 4     | Ø48x3            | 80        | 60                                  | 24  | 20                             | 2022                      |

| № п/п | Сечение труб, мм | $\lambda$ | $\frac{1}{2}$ Диаметр коннектора ( $l_k$ ), мм | Длина выступающей части болта ( $l_6$ ), мм | Толщина заглушки ( $t_3$ ), мм | Длина трубы ( $l_T$ ), мм |
|-------|------------------|-----------|--|---|--------------------------------|---------------------------|
| 1     | 1                | 2         | 3  | 4   | 5                              | 6                         |
| 5     | Ø48x3            | 90        | 60   | 24  | 20                             | 2022                      |
| 6     | Ø48x3            | 100       | 60   | 24  | 20                             | 2022                      |
| 7     | Ø48x3            | 110       | 60   | 24  | 20                             | 1712                      |
| 8     | Ø48x3            | 120       | 60   | 24  | 20                             | 1402                      |
| 9     | Ø48x3            | 130       | 60   | 24  | 20                             | 1402                      |
| 10    | Ø48x3            | 140       | 60   | 24  | 20                             | 1402                      |
| 11    | Ø159x12          | 50        | 100  | 24  | 60                             | 4852                      |
| 12    | Ø159x12          | 60        | 100  | 24  | 60                             | 4852                      |
| 13    | Ø159x12          | 70        | 100  | 24  | 60                             | 4852                      |
| 14    | Ø159x12          | 80        | 100  | 24  | 60                             | 4852                      |
| 15    | Ø159x12          | 90        | 100  | 24  | 60                             | 4852                      |
| 16    | Ø159x12          | 100       | 100  | 24  | 60                             | 4852                      |
| 17    | Ø159x12          | 110       | 100  | 24  | 60                             | 6462                      |
| 18    | Ø159x12          | 120       | 100  | 24  | 60                             | 5582                      |
| 19    | Ø159x12          | 130       | 100  | 24  | 60                             | 6462                      |
| 20    | Ø159x12          | 140       | 100  | 24  | 60                             | 5582                      |

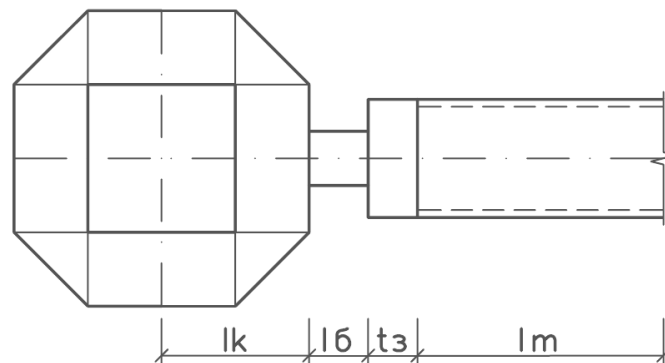


Рисунок 3.1 – Конструктивные параметры узлового соединения

Само же формирование расчётной модели в программном комплексе семейства ЛИРА-САПР реализовывалось в несколько шагов:

- создание оболочечной конечно-элементной (КЭ) модели трубы и узловых соединений (для всех 2-х типоразмеров);
- задание для модели трубы начального геометрического несовершенства в виде общей погиби полуволны синусоиды с максимальным отклонением в центре стержня ( $f/l = 1/700$ );

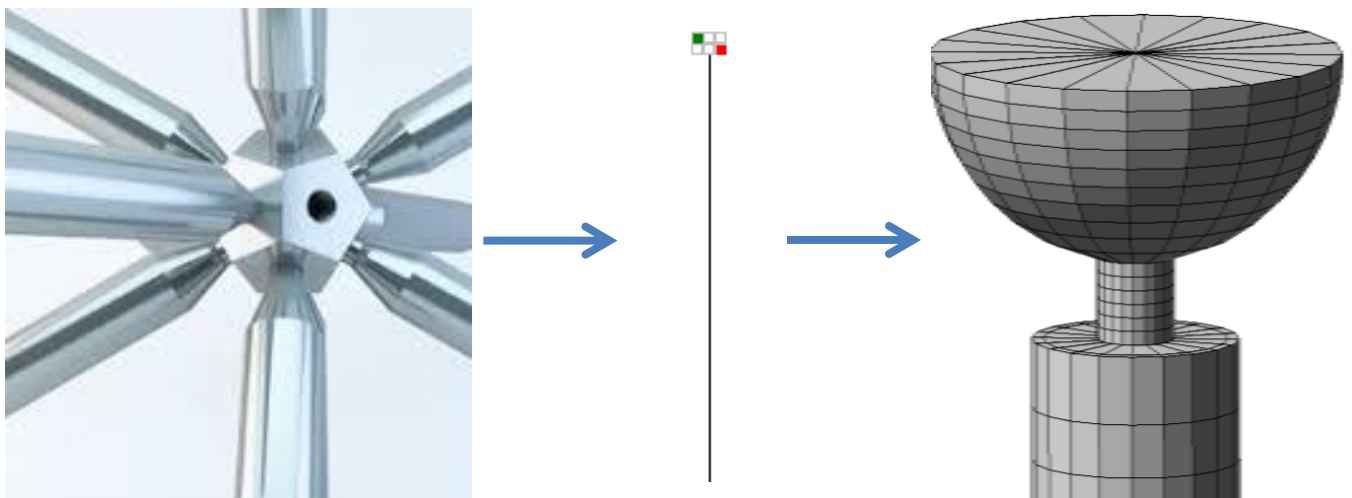
– задание внешней сжимающей нагрузки, превышающей прогнозируемое критическое значение согласно коэффициенту запаса устойчивости, заложенному в нормативных документах (ДБН).

Исследуемая труба моделировалась с помощью функции «Поверхности вращения», в которой КЭ сетка относительно вертикальной оси разбивалась на 100 элементов, а относительно поверхности вращения на 20 элементов. В идеализированной расчётной схеме геометрическая длина всех стержней принималась от узла закрепления до узла закрепления. Однако с учётом уточнённого моделирования узловых соединений длина стержней принималась фактическая (таблица 3.1 – столбец 6, рисунок 3.1). Как было указано выше, для всех типоразмеров труб задавалось начальное отклонение от вертикальной оси стержня, т.е. геометрические несовершенства, допускаемые при моделировании центрально-сжатых элементов  $h/l = 1/700$ . Таким образом, удалось описать отклонение для каждого узла:

$$y = f \sin \frac{n\pi}{100}, \quad (3.1)$$

где  $n$  – порядковый номер элемента ( $n = 1 \dots 100$ );

$$f = 1/700 l.$$



Фактическая схема

Идеализированная схема

Уточнённая модель

Рисунок 3.2 – Переход от фактической схемы к модели

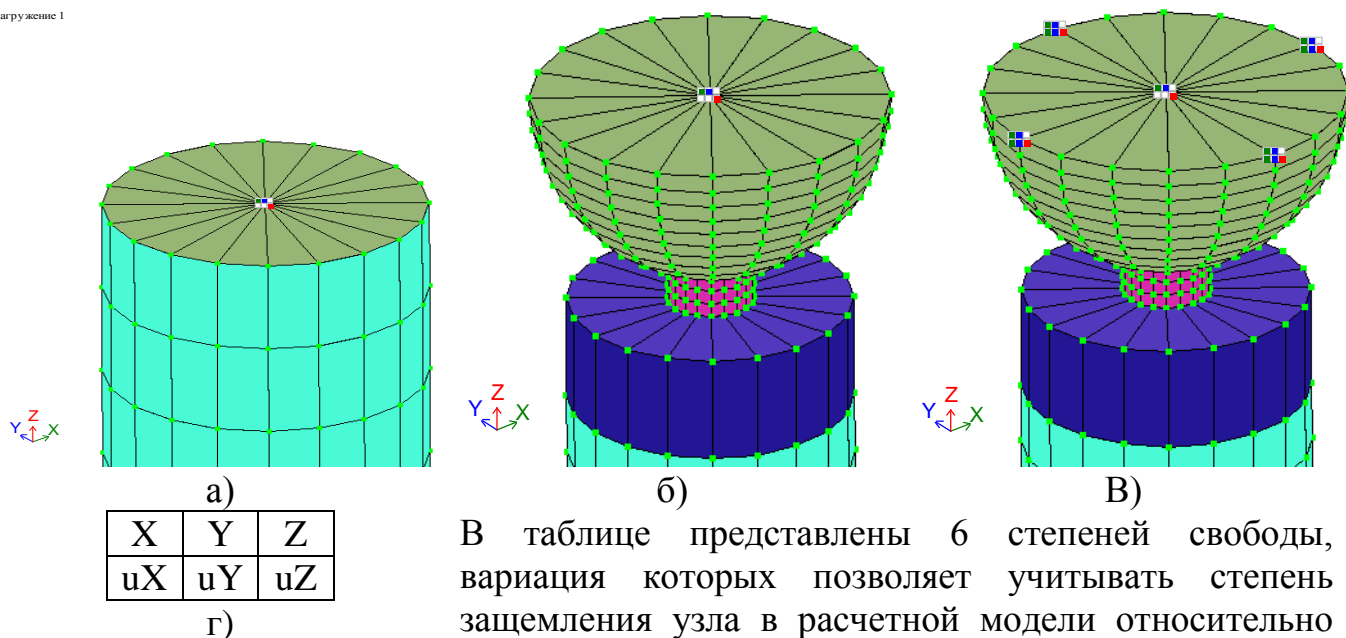
Для корректного моделирования узловых соединений в расчётную схему для каждого стержня введены свои размеры конструктивных элементов узлового соединения наряду с их соответствующей маркировкой (таблица 3.2, Рисунок 3.2).

Таблица 3.2 – Геометрические размеры конструктивных элементов узлового соединения

| № п/п | Сечение труб | Маркировка болта | Сечение коннектора | Сечение заглушки |
|-------|--------------|------------------|--------------------|------------------|
| 1     | 2            | 3                | 4                  | 5                |
| 1     | Ø48x3        | M22              | 120x120            | Ø48x20           |
| 2     | Ø159x12      | M48              | 200x200            | Ø159x60          |

Методология системы исследования основана на моделировании трех вариантов: исследование устойчивости пространственного стержня без моделирования узлового соединения (Рисунок 3.3, а), стержня с моделированием шарнирного закрепления коннектора, допускающее податливость коннектора (Рисунок 3.3, б), и моделирование стержня с жестким закреплением, отражающее работу узла в составе структурного покрытия (Рисунок 3.3, в). На рисунке 3.3 г, приводится пояснение по заданию граничных условий в ПК ЛИРА-САПР.

Загрузка 1



В таблице представлены 6 степеней свободы, вариация которых позволяет учитывать степень защемления узла в расчетной модели относительно базовой системы координат в ПК ЛИРА-САПР. Верхняя строчка – линейные перемещения. Нижняя строчка – угол поворота. Закрашенный квадратик указывает на запрещение указанной степени свободы.

Рисунок 3.3 – Моделирование связей в узлах схем

Критическая продольная нагрузка на стержень ( $N_{кр}^{ДБН}$ ) вычислялась как для центрально-сжатого элемента:

$$N_{кр}^{ДБН} = \varphi ARy, \quad (3.2)$$

но для максимально эффективной фиксации потери устойчивости конструкции значение  $N_{кр}^{ДБН}$  увеличивалось с учетом значения коэффициента запаса устойчивости, используемого в нормативных документах.

В расчётной схеме нагрузка прикладывалась, как сосредоточенная узловая нагрузка в узел верхнего коннектора с видом нагрузки «постоянная» с коэффициентом длительности 1,0.

Расчёт проводился в геометрически и физически нелинейной постановке с фиксацией процентного соотношения от полной нагрузки, при котором элементы в схеме теряют устойчивость [26, 29]. Материал для трубы и заглушки – сталь С245 (Рисунок 3.3, а), материалы для остальных элементов – 40Х «Селект» (Рисунок 3.4 б) [31-33]. Диаграммы деформирования заданы на рисунке 3.4 а, б.



Рисунок 3.4 – Диаграммы деформирования материала в ПК ЛИРА-САПР

Для перехода к анализу результатов исследования в конечно-элементной постановке необходимо сформировать массив критических нагрузок и напряжений, получаемых в результате решения задачи устойчивости классической методикой по формуле 2.6 и 2.12 (решение Эйлера -  $N_{кр}^Э$ ; решение Энгессера-Ясинского –  $N_{кр}^{Э-Я}$ ) и методом, предложенным согласно принятому в исследованиях нормативному документу по ДБН формуле 3.2 ( $N_{кр}^{ДБН}$ ).

Следует отметить, что различия в показателях критических сил и напряжений, получаемые аналитическими решениями и по ДБН (таблица 3.4),

характеризуются заложенным во втором решении учетом коэффициента запаса устойчивости, учитывающего возможные несовершенства элемента, влияющие на его несущую способность. Значение коэффициента запаса устойчивости (столбец 7–  $k_{з.у}$ ) в таблице 3.4 – это относительный показатель, характеризующийся как:

$$k_{з.у} = \frac{N_{кр}^{\text{Э}}; N_{кр}^{\text{Э-Я}}}{N_{кр}^{\text{ДБН}}}, \quad (3.3)$$

В рамках исследования этот коэффициент необходим для корректного понижения несущей способности, полученного по результатам расчетов в ПК ЛИРА-САПР. Сами же результаты расчета представлены в таблице 3.4 и в приложении А и обозначены, как  $N_{кр}^{\text{ЛИРА}}$ . Следует обратить внимание, что в этой таблице результаты расчета представлены «в чистом виде» без учета влияния коэффициента запаса устойчивости.

### 3.2. Анализ результатов численных исследований

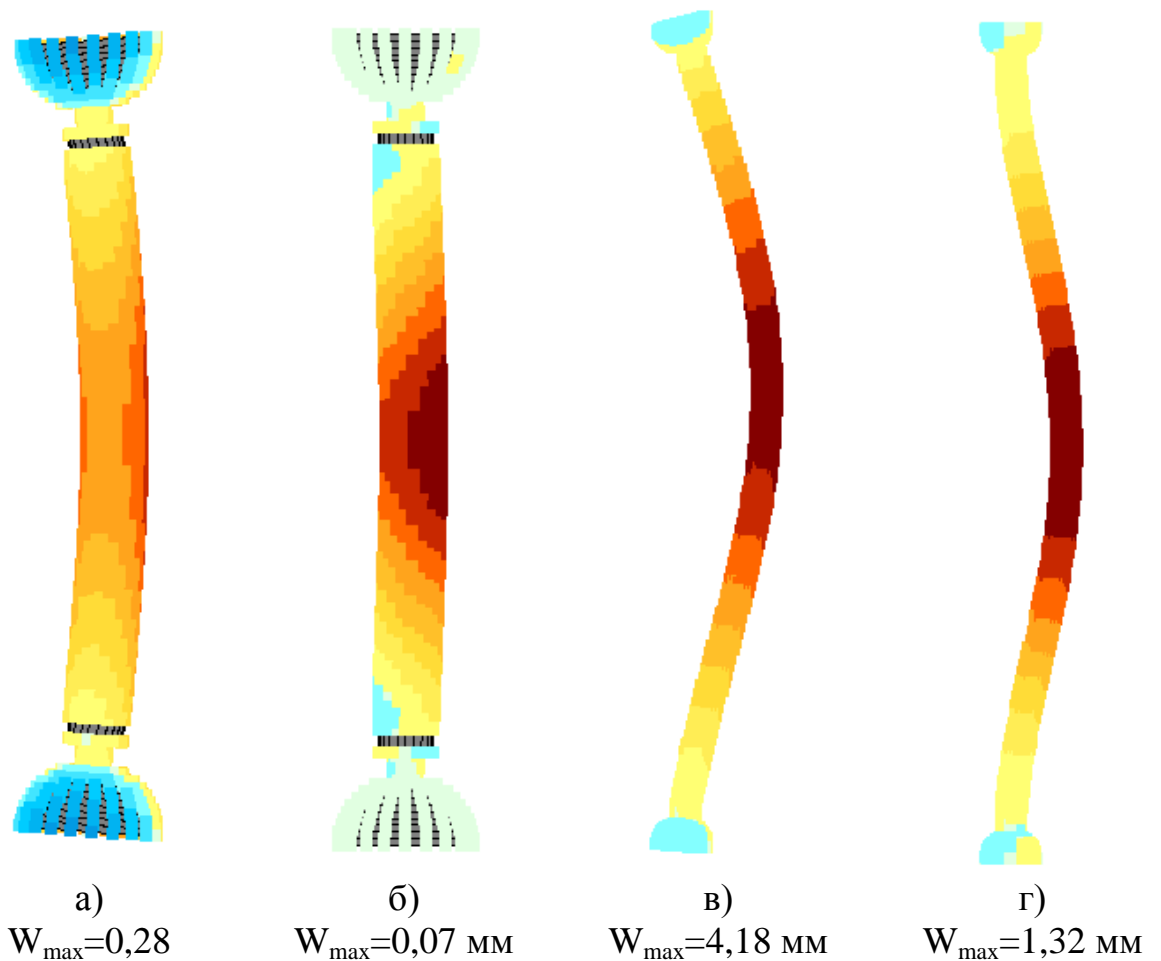


Рисунок 3.5 – Анализ деформированных осей элементов

Таблица 3.4 – Массив критических сил и напряжений, коэффициент запаса устойчивости

| Сечен.<br>труб     | $\lambda$                               | Массив критических сил и напряжений |   |                        |   |                           |  |                           |  |                           |  |         |       | Коэф.<br>запаса<br>устойч.<br>$k_{з.у}$ |
|--------------------|---|-------------------------------------|---|------------------------|---|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|---------|-------|---|
|                    |   | Аналитические значения              |   |                        |   | Нормативные значения      |  | Численные исследования    |  |                           |  |         |       |   |
|                    |   | Эйлер                               |   | Энгессер-Ясинский      |   | ДБН                       |  | ЛИРА-САПР                 |  |                           |  |         |       |   |
|                    |   | Без узлов                           |   | С шарнирными узлами    |   | С жесткими узлами         |  |                           |  |                           |  |         |       |   |
| $N_{кр}^Э$ ,<br>кН | $\sigma_{кр}^Э$ ,<br>кН/см <sup>2</sup> | $N_{кр}^{Э-Я}$ ,<br>кН              | $\sigma_{кр}^{Э-Я}$ ,<br>кН/см <sup>2</sup> | $N_{кр}^{ДБН}$ ,<br>кН | $\sigma_{кр}^{ДБН}$ ,<br>кН/см <sup>2</sup> | $N_{кр}^{ЛИРА-Б}$ ,<br>кН | $\sigma_{кр}^{ЛИРА-Б}$ ,<br>кН/см <sup>2</sup> | $N_{кр}^{ЛИРА-Ш}$ ,<br>кН | $\sigma_{кр}^{ЛИРА-Ш}$ ,<br>кН/см <sup>2</sup> | $N_{кр}^{ЛИРА-Ж}$ ,<br>кН | $\sigma_{кр}^{ЛИРА-Ж}$ ,<br>кН/см <sup>2</sup> |         |       |   |
| 1                  | 2                                       | 3                                   | 4   | 5                      | 6   | 7                         | 8  | 9                         | 10   | 11                        | 12   | 13      | 14    | 15                                      |
| 48x3               | 50                                      | -                                   | -   | 107.30                 | 25.30                                       | 92.60                     | 21.83  | 102.19                    | 24.10  | 105.90                    | 24.97  | 108.38  | 25.55 | 1.16                                    |
| 48x3               | 60                                      | -                                   | -   | 102.46                 | 24.16                                       | 88.70                     | 20.91  | 99.69                     | 23.51  | 104.84                    | 24.72  | 107.59  | 25.37 | 1.16                                    |
| 48x3               | 70                                      | -                                   | -   | 97.63                  | 23.02                                       | 83.70                     | 19.74  | 97.00                     | 22.87  | 103.47                    | 24.40  | 107.13  | 25.26 | 1.17                                    |
| 48x3               | 80                                      | -                                   | -   | 92.79                  | 21.88                                       | 77.40                     | 18.25  | 92.81                     | 21.88  | 102.09                    | 24.07  | 105.19  | 24.80 | 1.20                                    |
| 48x3               | 90                                      | -                                   | -   | 87.96                  | 20.74                                       | 70.10                     | 16.53  | 89.70                     | 21.15  | 101.75                    | 23.99  | 104.16  | 24.56 | 1.25                                    |
| 48x3               | 100                                     | 86.61                               | 20.42                                       | -                      | -   | 62.40                     | 14.71  | 87.75                     | 20.69  | 97.63                     | 23.02  | 103.13  | 24.32 | 1.39                                    |
| 48x3               | 110                                     | 71.58                               | 16.88                                       | -                      | -   | 54.90                     | 12.95  | 84.73                     | 19.98  | 96.25                     | 22.70  | 102.75  | 24.23 | 1.30                                    |
| 48x3               | 120                                     | 60.14                               | 14.18                                       | -                      | -   | 46.10                     | 10.87  | 79.00                     | 18.63  | 94.80                     | 22.35  | 100.41  | 23.68 | 1.30                                    |
| 48x3               | 130                                     | 51.25                               | 12.08                                       | -                      | -   | 39.30                     | 9.27   | 74.06                     | 17.46  | 92.81                     | 21.88  | 99.06   | 23.36 | 1.30                                    |
| 48x3               | 140                                     | 44.19                               | 10.42                                       | -                      | -   | 33.90                     | 7.99   | 68.78                     | 16.22  | 90.94                     | 21.44  | 98.75   | 23.28 | 1.30                                    |
| 159x12             | 50                                      | -                                   | -   | 1402.13                | 25.30                                       | 1210.30                   | 21.84  | 1354.69                   | 24.44  | 1378.13                   | 24.87  | 1429.69 | 25.80 | 1.16                                    |
| 159x12             | 60                                      | -                                   | -   | 1338.95                | 24.16                                       | 1159.10                   | 20.91  | 1321.25                   | 23.84  | 1355.06                   | 24.45  | 1425.00 | 25.71 | 1.16                                    |
| 159x12             | 70                                      | -                                   | -   | 1275.77                | 23.02                                       | 1093.70                   | 19.73  | 1271.56                   | 22.94  | 1314.00                   | 23.71  | 1401.56 | 25.29 | 1.17                                    |
| 159x12             | 80                                      | -                                   | -   | 1212.59                | 21.88                                       | 1011.70                   | 18.26  | 1239.07                   | 22.36  | 1291.03                   | 23.30  | 1392.38 | 25.12 | 1.20                                    |
| 159x12             | 90                                      | -                                   | -   | 1149.41                | 20.74                                       | 916.10                    | 16.53  | 1171.88                   | 21.15  | 1233.75                   | 22.26  | 1351.00 | 24.38 | 1.25                                    |
| 159x12             | 100                                     | 1125.39                             | 20.31                                       |                        |   | 867.70                    | 15.66  | 1167.65                   | 21.07  | 1212.75                   | 21.88  | 1355.92 | 24.47 | 1.38                                    |
| 159x12             | 110                                     | 930.23                              | 16.79                                       |                        |   | 717.10                    | 12.94  | 1100.00                   | 19.85  | 1178.13                   | 21.26  | 1325.00 | 23.91 | 1.30                                    |
| 159x12             | 120                                     | 781.52                              | 14.10                                       |                        |   | 602.50                    | 10.87  | 1043.44                   | 18.83  | 1126.25                   | 20.32  | 1315.88 | 23.74 | 1.30                                    |
| 159x12             | 130                                     | 665.81                              | 12.01                                       |                        |   | 513.40                    | 9.26   | 981.25                    | 17.71  | 1117.50                   | 20.16  | 1309.00 | 23.62 | 1.30                                    |
| 159x12             | 140                                     | 574.18                              | 10.36                                       |                        |   | 442.70                    | 7.99   | 937.50                    | 16.92  | 1085.31                   | 19.58  | 1285.97 | 23.20 | 1.30                                    |



При анализе результатов численных исследований проводилось сравнение полученного массива данных критических нагрузок и напряжений с соответствующими решениями, полученными на основе использования классических методик (решения Эйлера и Энгессера-Ясинского), а также, принятыми в современных нормах проектирования. Отмечены следующие закономерности:

- значительное отличие формы искривления оси стержня в момент потери устойчивости (рисунок 3.5) от схемы деформирования в виде полуволны синусоиды, используемого в классических решениях задачи устойчивости.
- заземление части длины приопорного участка стержня в узлах вставки-коннектора, что вызывает сокращение его расчетной длины, а следовательно, уменьшение гибкости и повышение несущей способности из условия устойчивости. Данный факт подтверждается снижением величин максимальных отклонений стержня, соответствующих моменту потери устойчивости ( $W_{\max}$  в 3-4 раза), обусловленных влиянием жесткости узлового соединения (Рисунок 3.5 а-г).

### 3.3. Создание регрессионных моделей по значениям критических напряжений и создание зависимостей «напряжения-гибкость»

По полученным результатам расчёта был сформирован массив данных для установления обобщенной зависимости между значимыми факторами, которые влияют на уточнённое расчётное значение критических напряжений ( $\sigma_{кр}$ ). Статистическая обработка массива данных выполняется с помощью функции «ЛИНЕЙН» (множественная линейная регрессия) в программе Microsoft EXCEL 2010 [20]. В таблице 3.5 представлен массив начальных данных, принятых для регрессионного анализа.

Таблица 3.5 – Массив данных для регрессионного анализа

| При жестких узлах |           |        |               | При шарнирных узлах |           |        |               |
|-------------------|-----------|--------|---------------|---------------------|-----------|--------|---------------|
| Сечение           | $\lambda$ | $2a/l$ | $\sigma_{кр}$ | Сечение             | $\lambda$ | $2a/l$ | $\sigma_{кр}$ |
|                   | x1        | x2     | y             |                     | x1        | x2     | y             |
| 48x3              | 50.00     | 0.26   | 25.55         | 48x3                | 50.00     | 0.26   | 24.97         |
| 159x12            | 50.00     | 0.74   | 25.80         | 159x12              | 50.00     | 0.74   | 24.87         |
| 48x3              | 60.00     | 0.22   | 25.37         | 48x3                | 60.00     | 0.22   | 24.72         |
| 159x12            | 60.00     | 0.61   | 25.71         | 159x12              | 60.00     | 0.61   | 24.45         |
| 48x3              | 70.00     | 0.19   | 25.26         | 48x3                | 70.00     | 0.19   | 24.40         |
| 159x12            | 70.00     | 0.53   | 25.29         | 159x12              | 70.00     | 0.53   | 23.71         |
| 48x3              | 80.00     | 0.16   | 24.80         | 48x3                | 80.00     | 0.16   | 24.07         |
| 159x12            | 80.00     | 0.46   | 25.12         | 159x12              | 80.00     | 0.46   | 23.30         |
| 48x3              | 90.00     | 0.15   | 24.56         | 48x3                | 90.00     | 0.15   | 23.99         |
| 159x12            | 90.00     | 0.41   | 24.38         | 159x12              | 90.00     | 0.41   | 22.26         |
| 48x3              | 100.00    | 0.13   | 24.32         | 48x3                | 100.00    | 0.13   | 23.02         |
| 159x12            | 100.00    | 0.37   | 24.47         | 159x12              | 100.00    | 0.37   | 21.88         |
| 48x3              | 110.00    | 0.12   | 24.23         | 48x3                | 110.00    | 0.12   | 22.70         |
| 159x12            | 110.00    | 0.33   | 23.91         | 159x12              | 110.00    | 0.33   | 21.26         |
| 48x3              | 120.00    | 0.11   | 23.68         | 48x3                | 120.00    | 0.11   | 22.35         |
| 159x12            | 120.00    | 0.31   | 23.74         | 159x12              | 120.00    | 0.31   | 20.32         |
| 48x3              | 130.00    | 0.10   | 23.36         | 48x3                | 130.00    | 0.10   | 21.88         |
| 159x12            | 130.00    | 0.28   | 23.62         | 159x12              | 130.00    | 0.28   | 20.16         |
| 48x3              | 140.00    | 0.09   | 23.28         | 48x3                | 140.00    | 0.09   | 21.44         |
| 159x12            | 140.00    | 0.26   | 23.20         | 159x12              | 140.00    | 0.26   | 19.58         |

После формирования массива, полученные в ходе регрессионного анализа значения критических напряжений ( $\sigma_{кр}^{рег}$ ) искусственно уменьшались, за счет деления их значений на коэффициент запаса устойчивости ( $\sigma_{кр}^{рег-к}$ ). После проведения этой операции, полученные значения усреднялись по одинаковому показателю гибкости для введения их в отображенную на рисунке 3.6 зависимость «Напряжения-гибкость». Все значения, получаемые в ходе манипуляции, приведены в таблице 3.6.

Следует отметить, что построенные две регрессионные модели являются адекватными, так как заданные значения напряжений и результативные значения напряжений коррелируют между собой для модели при жестких узлах – 0,989 и для модели при шарнирных узлах – 0,951.

Таблица 3.6 – Результаты регрессионного анализа и их обработка

| При жестких узлах |                     |           |                       |                     | При шарнирных узлах |                     |           |                       |                      | По ДБН                 |
|-------------------|---------------------|-----------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| $\lambda$         | $\sigma_{кр}^{рег}$ | $k_{з.у}$ | $\sigma_{кр}^{рег-к}$ | $\sigma_{кр}^{ср'}$ | $\lambda$           | $\sigma_{кр}^{рег}$ | $k_{з.у}$ | $\sigma_{кр}^{рег-к}$ | $\sigma_{кр}^{ср''}$ | $\sigma_{кр}^{ср-ДБН}$ |
| 50                | 25.70               | 1.16      | 22.18                 | 22.25               | 50                  | 25.61               | 1.16      | 22.10                 | 21.47                | 21.84                  |
| 50                | 25.86               | 1.16      | 22.33                 |                     | 50                  | 24.15               | 1.16      | 20.85                 |                      |                        |
| 60                | 25.41               | 1.16      | 22.00                 | 22.06               | 60                  | 25.13               | 1.16      | 21.76                 | 21.23                | 20.91                  |
| 60                | 25.55               | 1.16      | 22.12                 |                     | 60                  | 23.92               | 1.16      | 20.70                 |                      |                        |
| 70                | 25.13               | 1.17      | 21.54                 | 21.59               | 70                  | 24.62               | 1.17      | 21.10                 | 20.66                | 19.74                  |
| 70                | 25.25               | 1.17      | 21.64                 |                     | 70                  | 23.57               | 1.17      | 20.21                 |                      |                        |
| 80                | 24.85               | 1.20      | 20.72                 | 20.77               | 80                  | 24.08               | 1.20      | 20.08                 | 19.70                | 18.25                  |
| 80                | 24.95               | 1.20      | 20.82                 |                     | 80                  | 23.17               | 1.20      | 19.33                 |                      |                        |
| 90                | 24.57               | 1.25      | 19.58                 | 19.62               | 90                  | 23.52               | 1.25      | 18.75                 | 18.42                | 16.53                  |
| 90                | 24.66               | 1.25      | 19.65                 |                     | 90                  | 22.71               | 1.25      | 18.10                 |                      |                        |
| 100               | 24.29               | 1.39      | 17.50                 | 17.58               | 100                 | 22.96               | 1.39      | 16.54                 | 16.32                | 14.71                  |
| 100               | 24.37               | 1.38      | 17.66                 |                     | 100                 | 22.23               | 1.38      | 16.11                 |                      |                        |
| 110               | 24.01               | 1.30      | 18.42                 | 18.49               | 110                 | 22.38               | 1.30      | 17.17                 | 16.95                | 12.94                  |
| 110               | 24.09               | 1.30      | 18.57                 |                     | 110                 | 21.72               | 1.30      | 16.74                 |                      |                        |
| 120               | 23.74               | 1.30      | 18.21                 | 18.28               | 120                 | 21.80               | 1.30      | 16.72                 | 16.53                | 10.87                  |
| 120               | 23.81               | 1.30      | 18.35                 |                     | 120                 | 21.19               | 1.30      | 16.34                 |                      |                        |
| 130               | 23.46               | 1.30      | 18.00                 | 18.07               | 130                 | 21.22               | 1.30      | 16.27                 | 16.10                | 9.27                   |
| 130               | 23.53               | 1.30      | 18.14                 |                     | 130                 | 20.65               | 1.30      | 15.92                 |                      |                        |
| 140               | 23.19               | 1.30      | 17.79                 | 17.85               | 140                 | 20.63               | 1.30      | 15.82                 | 15.66                | 7.99                   |
| 140               | 23.25               | 1.30      | 17.92                 |                     | 140                 | 20.11               | 1.30      | 15.50                 |                      |                        |

Представленная на рисунке 3.7 аппроксимационная кривая с достаточной для практических расчетов точностью описывает зависимость  $\sigma_p$ - $\lambda$ :

$$y = 0.0004x^2 - 0.1536x + 28.681 \quad (3.4)$$

где:  $y$  – результативный показатель ( $\sigma_p$ );  $x$  – значение гибкости ( $\lambda$ )

Анализируя зависимости на рисунке 3.7 можно отметить следующие особенности:

– хорошее качественное и количественное совпадение характера кривых представленных зависимостей  $\sigma_p$ - $\lambda$  для шарнирного и жесткого закрепления узлов элементов, что свидетельствует об устойчивости полученных результатов и корректности выбранной расчетной схемы для всего диапазона анализируемых гибкостей;

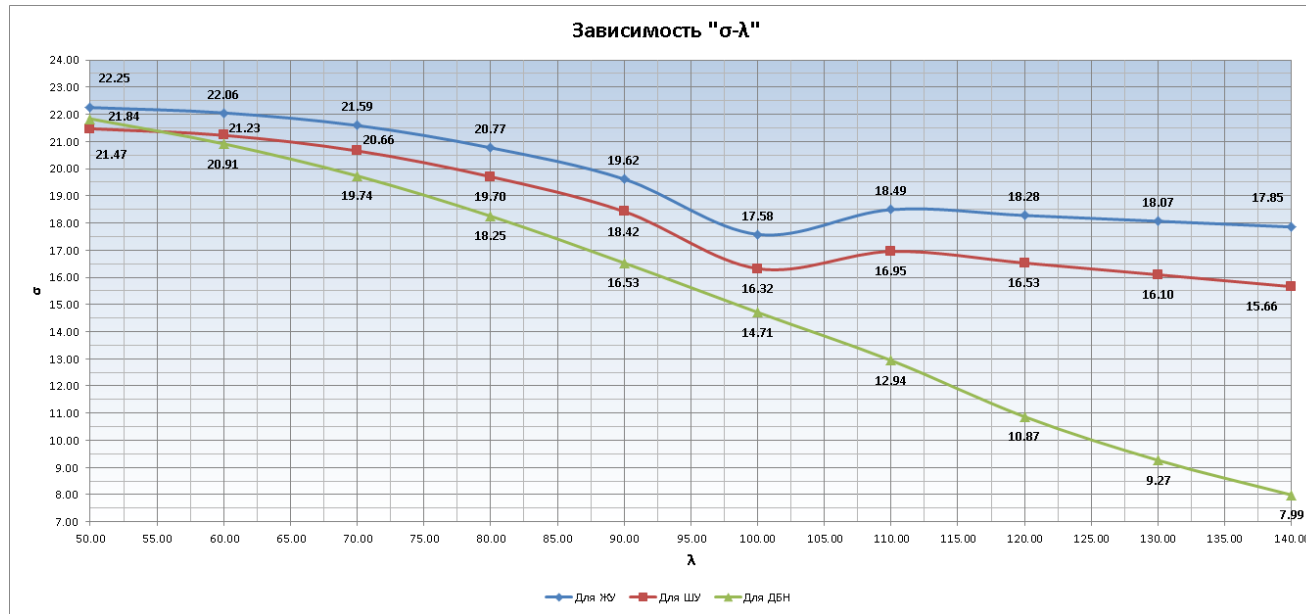


Рисунок 3.6 – Кривые зависимости «Напряжения-гибкость»

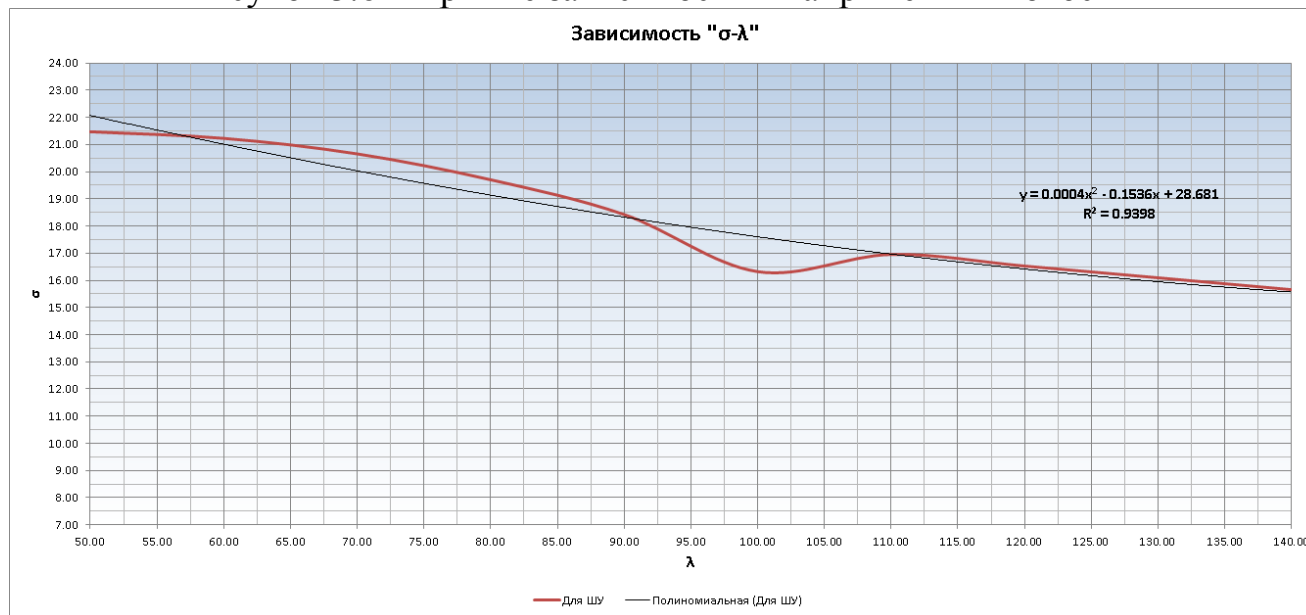


Рисунок 3.7 – Аппроксимация значений кривой «Для ШУ»

– имеющийся «провал» на всех расчетных кривых в диапазоне гибкостей  $\lambda=90\dots100$  объясняется переходом с расчетной формулы Энгессера-Ясинского на формулу Эйлера для рассматриваемой стали с расчетным сопротивлением  $R_y=240$  МПа;

– наблюдается хорошее совпадение результатов выполненных исследований с данными нормативных документов в зоне малых гибкостей ( $\lambda\leq 60$ ) и увеличивающиеся отличия по мере возрастания гибкостей. Данный факт может объясняться увеличивающимся по мере роста гибкостей влиянием факторов, напрямую не учитываемых в данном исследовании, в отличие от заданного начального геометрического несовершенства;

– представленная на рисунке 3.7 зависимость  $\sigma_p-\lambda$ , построенная для стержня с шарнирными узловыми креплениями в дальнейшем используется для установления коэффициентов  $\mu$  и  $\varphi$  (см. пункт 3.4) в качестве исходной, соответствующей представленной зависимости при значении  $\mu=1$ .

3.4. Определение коэффициента приведения к расчетной длине и коэффициента продольного изгиба

На основе установленной зависимости  $\sigma_p-\lambda$ , установлены значения коэффициента приведения геометрической длины стержня к расчетной (коэффициент  $\mu$ ), учитывающего частичное защемление стержня в узлах структурной конструкции в виде шаровых вставок-коннекторов. Упрощенное определение коэффициента  $\mu$  в данном случае базируется на применении формул Эйлера и Энгессера-Ясинского.

1. Определение коэффициента  $\mu$  в диапазоне гибкостей 90-120 (для стали с С245,  $R_y=240$  Мпа), при работе материала в упругой стадии.

Исходим из равенства:

$$N_{кр}^{ЛИРА} = k_1(k_2)N_{кр}^{\text{Э}} \quad (3.5)$$

где  $k_1(k_2)$  – переходной коэффициент, связывающий значения критических сил для жестких узлов ( $k_2$ ) (таблица 3.4, столбец «13») и шарнирных узлов ( $k_1$ ) (таблица 3.4, столбец «14») к значениям критических сил без моделирования узловых соединений (таблица 3.4, столбец «9»). Формульные обозначения приводятся в таблице 3.7.

Тогда

$$k_1(k_2)N = \frac{\pi^2 EI}{\mu^2 l^2 k_{3,y}} \quad (3.6)$$

Путем простейших преобразований из формулы (3.6) получаем значение  $\mu$  для анализа устойчивости стержней в упругой стадии работы материала.

$$\mu_1(\mu_2) = \frac{1}{\sqrt{k_1(k_2)}} \quad (3.7)$$

2. Определение коэффициента  $\mu$  в диапазоне гибкостей 50-99 (для стали с С245,  $R_y=240$  Мпа), при работе материала в упруго-пластической стадии.

В качестве исходной предпосылки используем формулу (3.5). При вычислении правой части, учитывая упруго-пластическую работу материала, выполним замену выражения, базирующегося на формуле Эйлера на формулу Ясинского:

$$N_{кр}^{ЛИРА} = k_1(k_2)N_{кр}^Я = \frac{k_3 A(a - b\lambda)}{\sigma_{кр}^{ЛИРА}} \quad (3.8)$$

где  $k_3$  – переходной коэффициент, связывающий значения критических сил без моделирования узловых соединений (таблица 3.4, столбец «9») к критической нагрузке по Энгессеру-Ясинскому (таблица 3.4, столбец «5»). Формульные обозначения приводятся в таблице 3.7.

Учитывая, что  $\lambda = \frac{\mu l}{i}$ , подставим данное соотношение в формулу (3.8) и после некоторых преобразований выразив из нее  $\mu$ , получим:

$$\mu_1(\mu_2) = \frac{1}{\lambda b} \left( a - \frac{k_1(k_2)}{k_3} \sigma_{\text{кр}}^{\text{ЛИРА}} \right) \quad (3.9)$$

Таблица 3.7 – Нахождение вспомогательных коэффициентов

| Коэффициент | Формула   |
|-------------|---|
| $k_1$       | $\frac{N_{\text{кр}}^{\text{ЛИРА-Ш}}}{N_{\text{кр}}^{\text{ЛИРА-Б}}}$ |
| $k_2$       | $\frac{N_{\text{кр}}^{\text{ЛИРА-Ж}}}{N_{\text{кр}}^{\text{ЛИРА-Б}}}$ |
| $k_3$       | $\frac{N_{\text{кр}}^{\text{ЛИРА-Б}}}{N_{\text{кр}}^{\text{Э-Я}}}$    |

Сформированные значения коэффициентов  $\mu$  усреднялись между собой по условиям закрепления и исходя из исследуемых сечений центрально-сжатых стержней.

На основании установленных значений  $\mu$  – учитывающего в данном случае степень защемления стержня в узлах структуры и значения гибкости стержня  $\lambda$ , напрямую зависящего от  $\mu$ , а также используя известное соотношение для определения коэффициента продольного изгиба ( $\varphi = \frac{\sigma_p}{R_y}$ ) окончательно назначим значения  $\mu$ ,  $\varphi \rightarrow f(\lambda)$ , приведенные в таблице 3.8, которые могут быть использованы при уточненной проверке несущей способности центрально-сжатых стержней из условия устойчивости наряду с выполнением условия  $\sigma \leq \sigma_{\text{кр}}^p$ .

Таблица 3.8 – Зависимости  $\mu$ - $\lambda$ ,  $\varphi$ - $\lambda$ 

|           |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\lambda$ | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   | 110   | 120   |
| $\mu$     | 0.83  | 0.88  | 0.91  | 0.93  | 0.94  | 0.95  | 0.95  | 0.95  |
| $\varphi$ | 0.933 | 0.892 | 0.854 | 0.820 | 0.789 | 0.760 | 0.739 | 0.721 |

### 3.5. Выводы по результатам III-го раздела

На основании выполненных численных исследований влияния конструктивного исполнения узловых соединений на несущую способность центрально-сжатых стержней элементов структурных покрытий можно сформулировать следующие выводы:

1. Конечно-элементная детализация расчетной схемы стержневого элемента и узлового соединения структурного покрытия в сочетании с использованием возможностей нелинейного анализа напряженно-деформированного состояния, в геометрически и физически нелинейной постановке, позволили уточнить несущую способность центрально-сжатых элементов структурного покрытия из условия устойчивости.

2. Для элементов малой и средней гибкости (при гибкости стержней  $\lambda < 82$  при  $R = 240$  МПа) несущая способность стержней несколько понижается по сравнению с данными отечественных норм проектирования (в пределах 1...10%), что объясняется повышенным влиянием изгибных напряжений ( $\sigma_{loc}^M$ ) в зонах действия локального изгибающего момента, что способствует более раннему достижению на этих участках напряжений превышающих  $\sigma_T$ , с последующей потерей устойчивости.

3. Для элементов высокой (при гибкости стержней  $\lambda > 82$  при  $R = 240$  МПа) несущая способность стержней, наоборот, повышается по сравнению с данными отечественных норм проектирования. При этом в диапазоне гибкостей 83-100 увеличение составляет менее 10%. С увеличением гибкости отличие от нормативных документов увеличивается в сторону большей несущей способности (в отдельных случаях свыше 50%), что объясняется:

- значительным отличием формы искривления оси стержня в момент потери устойчивости (рисунок) от схемы деформирования в виде полуволны синусоиды, используемого в классических решениях задачи устойчивости.
- защемлением части длины приопорного участка стержня в узлах вставки-коннектора, что вызывает сокращение его расчетной длины, а следовательно, уменьшение гибкости и повышение несущей способности из условия устойчивости.

4. Уточненная несущая способность центрально-сжатых стержней структурных покрытий из условия устойчивости с достаточной для практических расчетов точностью может быть описана зависимостью  $\sigma_{кр}^p = 0,0004\lambda^2 -$



$0,1536\lambda + 28.681$ , полученной на основе аппроксимации множественной линейной регрессии. Адекватность построенной кривой подтверждается значением среднеквадратичного отклонения, равное 0,94.

5. С целью возможности выполнения расчетов центрально-сжатых стержней из условия устойчивости в традиционной для отечественных норм проектирования форме на основе установленных значений получены значения коэффициентов  $\mu$  и  $\varphi$ , учитывающих гибкость и степень защемления стержня в соединениях структурных конструкций с шаровыми вставками-коннекторами.

## «РАЗДЕЛ IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ УЗЛОВОГО СОЕДИНЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ»

4.1. Цели и задачи экспериментальных исследований потери устойчивости центрально-сжатых стержней

Цель экспериментальных исследований заключается в экспериментальной проверке и подтверждении результатов численных исследований, сформулированных в IV-м разделе работы.

Основные задачи заключаются в проведении испытаний:

- одиночного стержня с конструкцией схемой, соответствующей идеализированной расчетной схеме центрально-сжатого стержня, потеря устойчивости которого происходит в пределах упругой стадии работы материала;
- ячейки структурного покрытия с узловыми соединениями в виде типовых шаровых коннекторов, объединяющих стержни большой гибкости, теряющих устойчивость при упругой работе материала;

4.2. Общая схема испытательных установок

В качестве основного измерительного оборудования планируется применение:

- для измерения относительных деформаций - первичных преобразователей в виде тензорезисторов на бумажной основе с базой  $l=20$  мм и номинальным сопротивлением  $R=200$  Ом (Рисунок 4.1, а);
- для измерения линейных перемещений – индикаторов часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм (Рисунок 4.1, б);
- для регистрации изменения омического сопротивления первичных преобразователей – ОВЕН МВ110-224. 1ТД (Рисунок 4.1, в);
- для опроса, визуализации и архивирования параметров по полученным данным – SoftLogic–система MasterSCADA 3.xDemo.

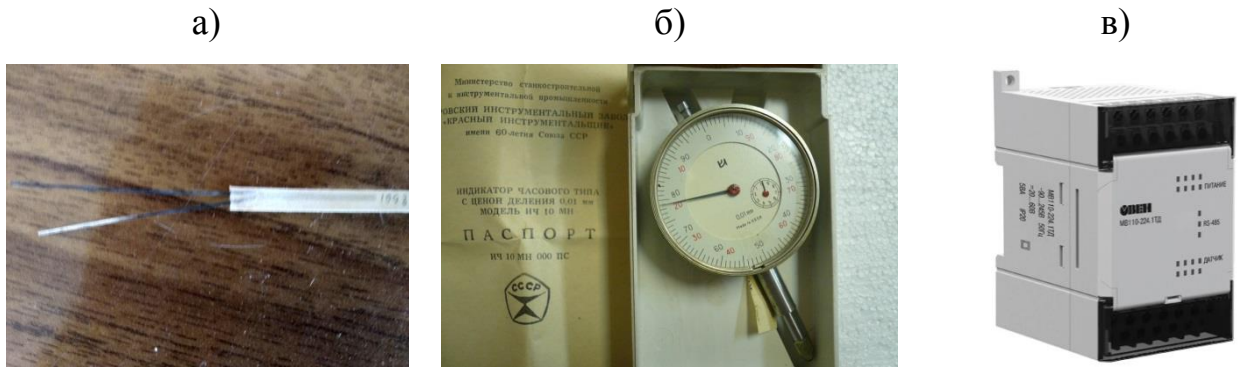


Рисунок 4.1 – Общий вид измерительного оборудования: а – проволочный петлевой тензорезистор, б – индикатор часового типа ИЧ-10, в – прибор для регистрации данных первичных преобразователей ОВЕН МВ110-224.4ТД

Обоснование точности используемого к применению оборудования приведено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Обоснование возможности применения измерительного оборудования

| № п/п | Фиксируемый показатель             | Тип используемого оборудования                          | Цена деления прибора  | Погрешность измерения |
|-------|------------------------------------|---|-----------------------|-----------------------|
| 1.    | Нагрузка                           | Гидродомкрат ДГ-100, ДГ-20                              | 1 кгс/см <sup>2</sup> | -                     |
| 2.    | Относительная деформация           | Тензорезистор КФ5П1-20-200-А-12-С1                      | -                     | ±1 Ом                 |
| 3.    | Перемещение                        | Индикатор часового типа ИЧ-10, прогибомер ПАО-6         | 0,01 мм               | От 15 до 20 мкм       |
| 4.    | Изменение омического сопротивления | Модуль ввода сигналов тензодатчиков ОВЕН МВ110-224.4.ТД | 0,01 МПа              | ±0.05 %               |

Для лабораторных испытаний в качестве экспериментальных исследований приняты 2 испытательные установки:

– Ячейка структурного покрытия, раскосы которой потеряют устойчивость в упругой стадии работы материала ( $\lambda_{\text{раскос}} = 120$ ) (Рис. 4.2, 4.3.а,б) [25].



Рисунок 4.2 – Схема испытываемой модели (вид по диагонали)

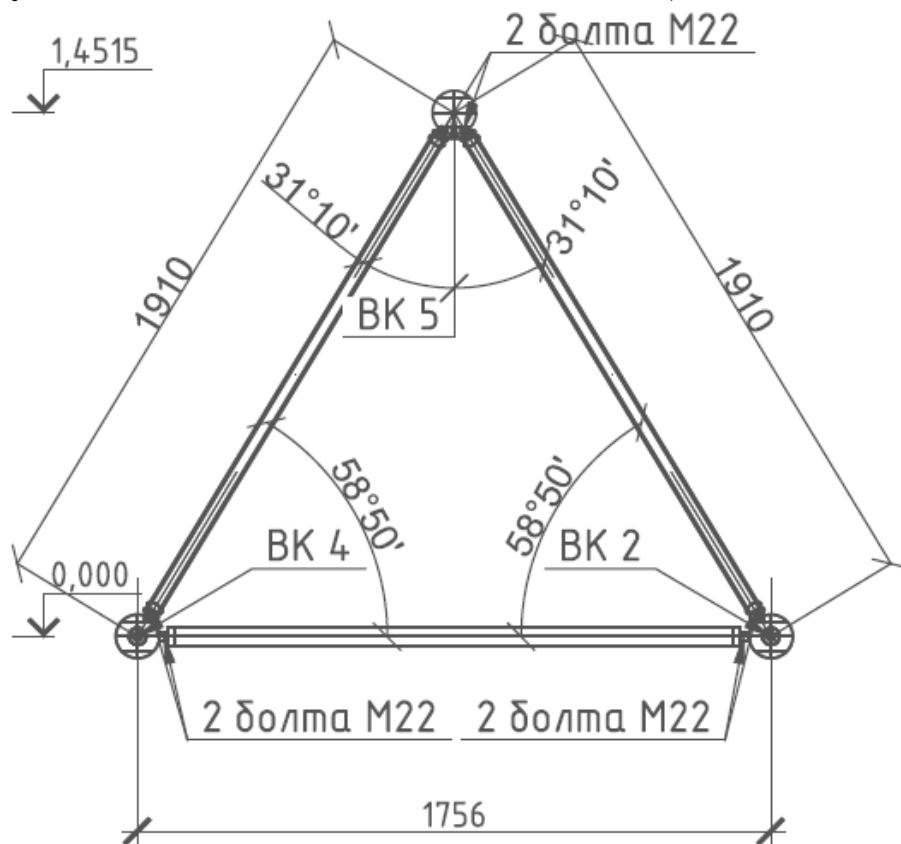


Рисунок 4.3.а – Схема испытываемой модели (вид модели)

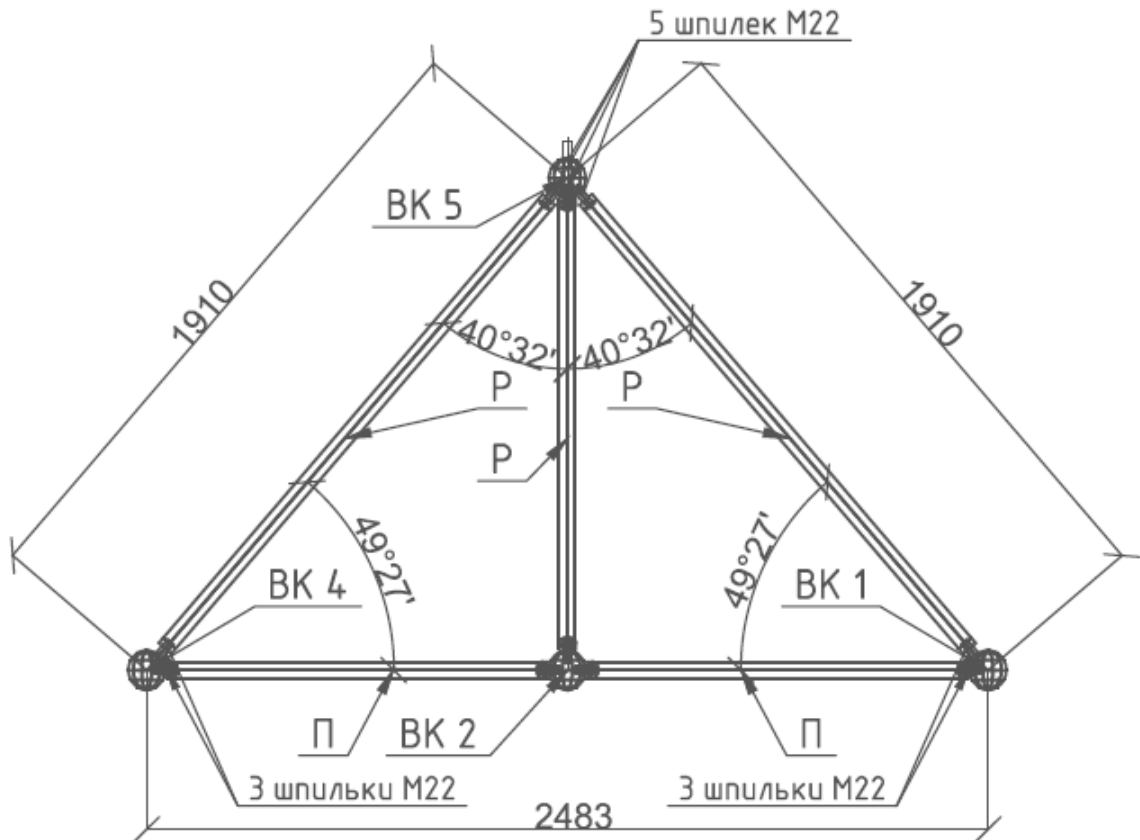


Рисунок 4.3.б – Схема испытываемой модели (вид по диагонали)

В таблице 4.2 и 4.3 представлены сечения элементов испытываемой модели, соответствующей маркировки, указанные на рисунке 4.3.а,б.

Таблица 4.2 – Ведомость элементов

| Марка | Сечение |      |        |       | Количество | Сталь | Примечание |
|-------|---------|------|--------|-------|------------|-------|------------|
|       | Эскиз   | Поз. | Состав | Длина |            |       |            |
| ВК1   | ●       | 1    | Ø120   | -     | 1          | Ст40  |            |
| ВК2   | ●       | 2    | Ø120   | -     | 1          | Ст40  |            |
| ВК3   | ●       | 3    | Ø120   | -     | 1          | Ст40  |            |
| ВК4   | ●       | 4    | Ø120   | -     | 1          | Ст40  |            |
| ВК5   | ●       | 5    | Ø120   | -     | 1          | Ст40  |            |
| Р     | ○       | 6    | Ø48x3  | 1700  | 4          | Ст2   |            |
| П     | ○       | 7    | Ø48x3  | 1546  | 4          | Ст2   |            |
| З     | ○       | 8    | Ø48x22 | 20    | 16         | Ст20  |            |

Таблица 4.3 – Ведомость метизов

| Наименование   | ГОСТ, ТУ      | Кол-во шт. | Сталь | Примечание |
|----------------|---------------|------------|-------|------------|
| Шпилька M22x75 | ГОСТ 22042-76 | 17         | Ст20  |            |

Для исследования процесса потери устойчивости раскосов, на основании предварительных расчетов, результаты которых изображены на рисунках 4.4-4.9,

выявлены места расстановки тензорезисторов и индикаторов часового типа. Так, на один раскос (Р) на расстоянии 850 мм от края стержня, устанавливаются 4 тензорезистора и 2 – в приопорной зоне стержня, направление которых определено начальным отклонением от оси элемента. Такое количество датчиков в его сечении обусловлено необходимостью поиска изгибающего момента в двух плоскостях. Также, в центре сечения элемента необходима установка 2-х индикаторов часового типа для поиска максимальных перемещений от края стержня. Расстановка индикаторов в центре стержня также обусловлена результатами расчета.

Расчетная схема экспериментальной модели выполнена в программном комплексе семейства «ЛИРА-САПР 2019 R1» и имеет следующие характеристики:

- количество узлов расчетной схемы – 39642;
- количество элементов расчетной схемы – 24440, в составе которых:
  - для моделирования стержней, заглушек и болтов – 19840 объёмных элементов;
  - для моделирования коннекторов – 4600 3-х и 4-х узловых пластин;
- в узлах коннектора заданы граничные условия (запрет линейных перемещений относительно оси  $u$  и  $x$ );
- расчетная критическая нагрузка, приложенная в верхний коннектор, равняется 22755 кг;
- количество неизвестных в расчетной схеме составляет 127302.

По результатам численных исследований критическая продольная сила составляет –79,545 кН.

- Одиночный стержень, теряющий устойчивость в упругой стадии ( $\lambda=120$ ) (рисунок 4.11-4.12) со следующими геометрическими характеристиками:

Загружение 1

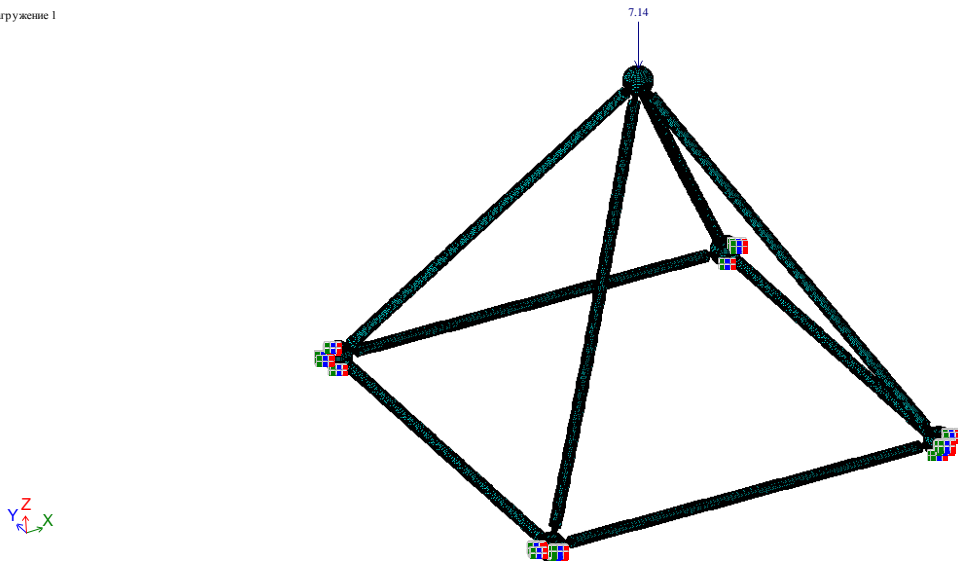


Рисунок 4.4 – Расчетная схема ячейки структурной конструкции

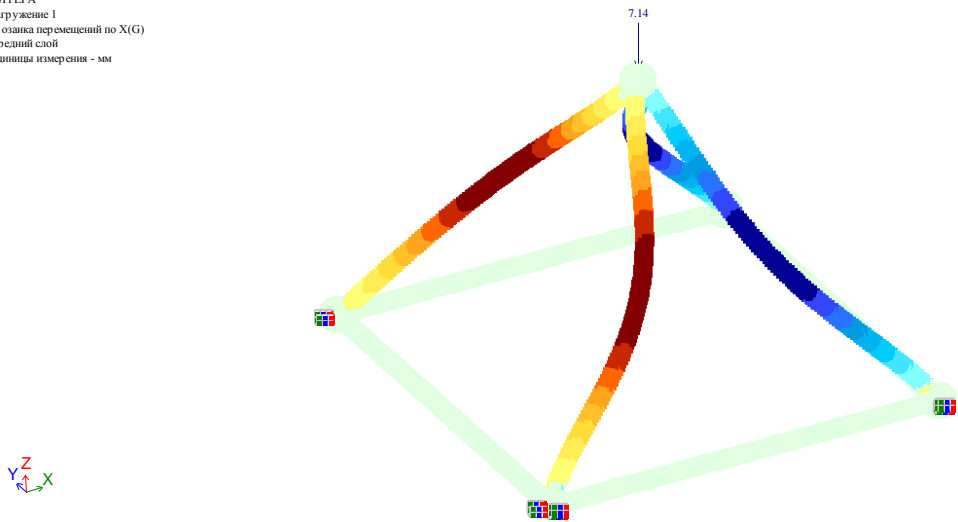
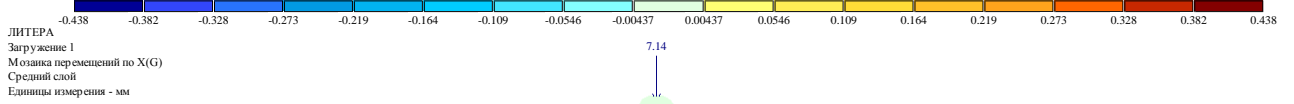


Рисунок 4.5 – Перемещения по X

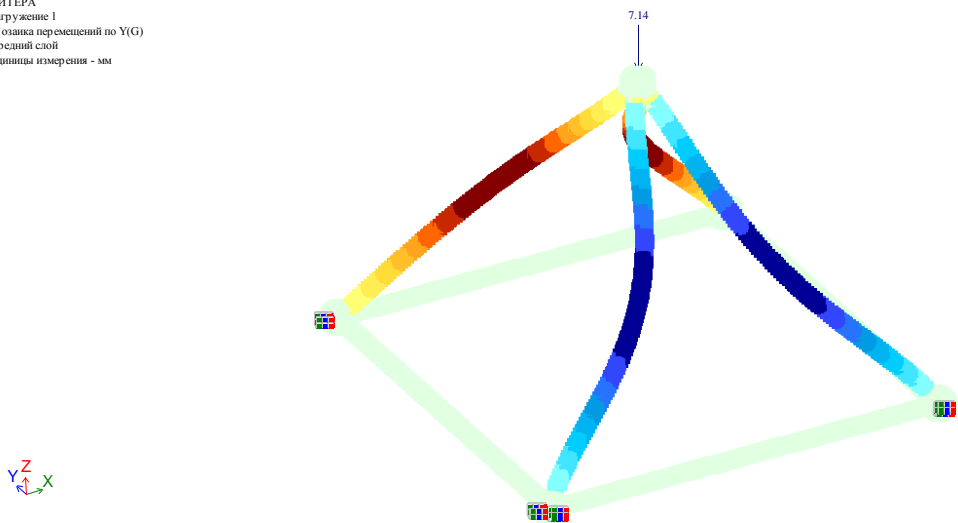
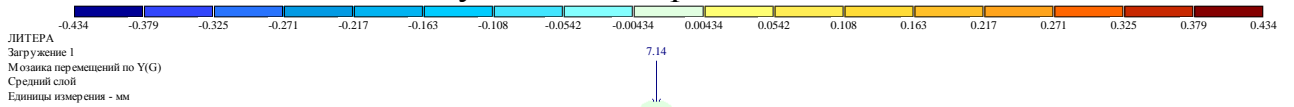


Рисунок 4.6 – Перемещения по Y

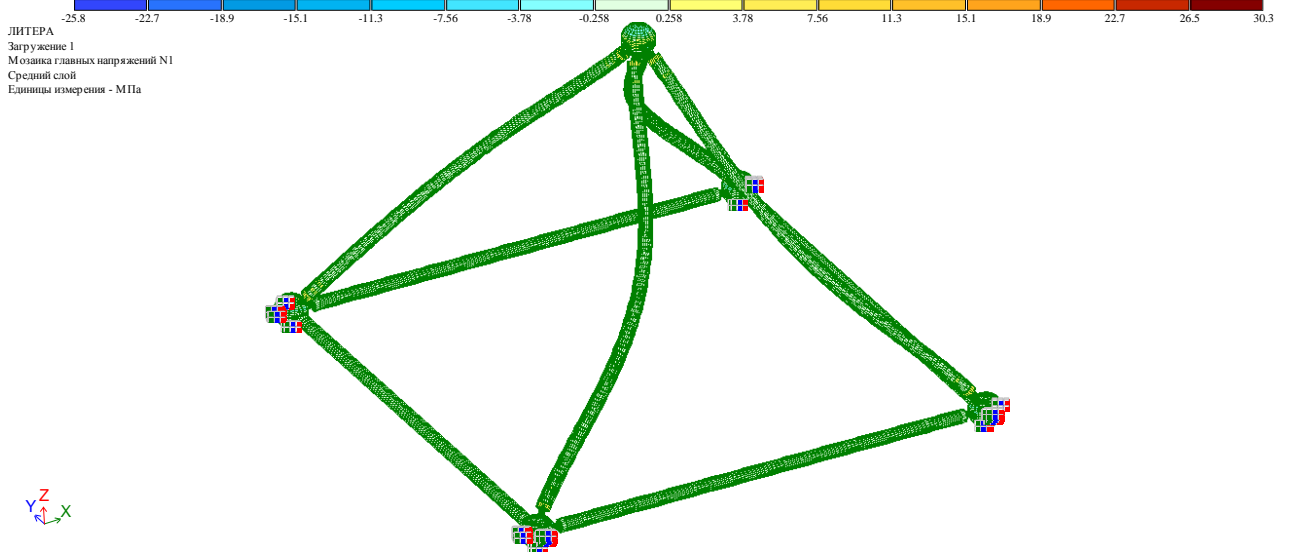


Рисунок 4.7 – Главные напряжения N1

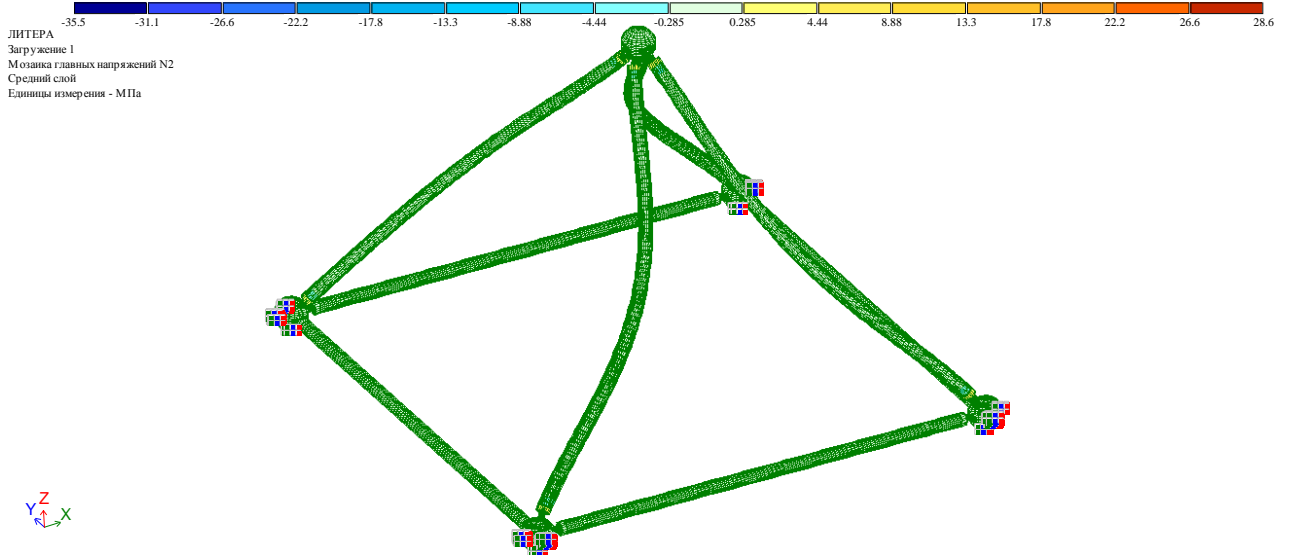


Рисунок 4.8 – Главные напряжения N2

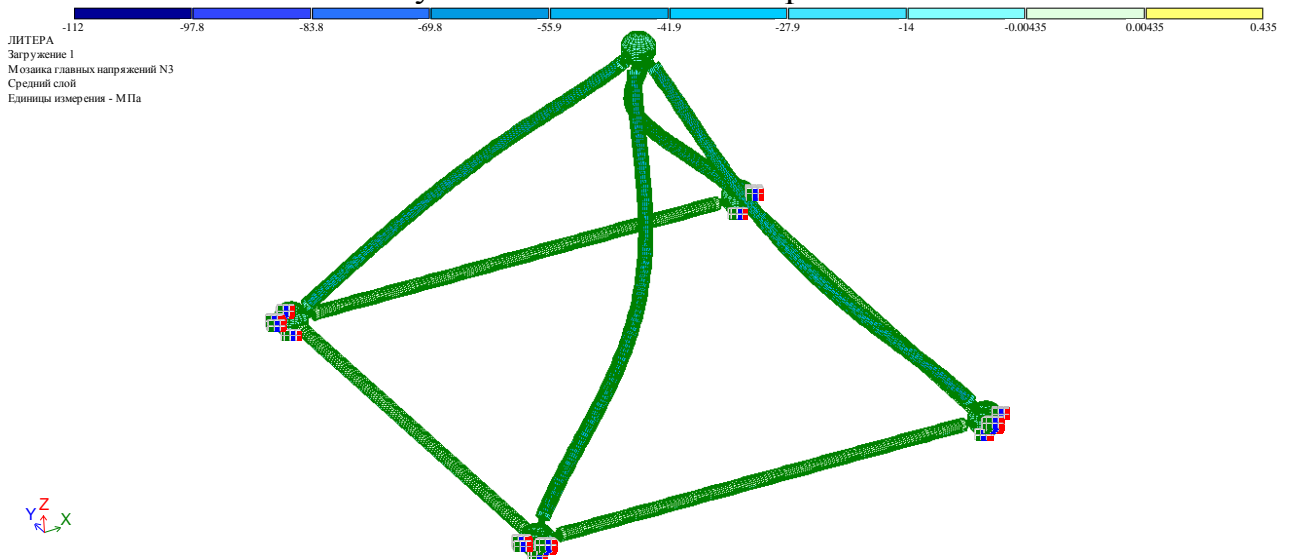


Рисунок 4.9 – Главные напряжения N3





Рисунок 4.11 – Расчетная схема стержня



Рисунок 4.12 – Фотография экспериментальной модели

- стержень:  $\varnothing 48 \times 3$  мм, материал – Сталь 2, длина – 932 мм.
- заглушка:  $\varnothing 48 \times 22$  мм, материал – Сталь 20, длина – 20 мм.
- болты: шпилька M22x75, материал – Сталь 2.

Для исследования процесса потери устойчивости стержня, на основании предварительных расчетов, результаты которых изображены на рисунках 4.13-4.14, выявлены места расстановки тензорезисторов прогибомеров. Так, на один стержень на расстоянии 466 мм от края устанавливаются 12 тензорезисторов (4 розетки) и 4 – в приопорной зоне стержня, направление которых определено начальным отклонением от оси элемента. Такое количество датчиков в его сечении обусловлено необходимостью поиска изгибающего момента в двух плоскостях. Также, в центре сечения элемента необходима установка 2-х прогибомеров для поиска максимальных перемещений от края стержня. Расстановка прогибомеров в центре стержня также обусловлена результатами расчета.

Расчетная схема экспериментальной модели выполнена в программном комплексе семейства «ЛИРА-САПР 2019 R1» и имеет следующие характеристики:

- количество узлов расчетной схемы – 4084;
- количество элементов расчетной схемы – 2040;
- в узлах центра коннектора заданы граничные условия (запрет линейных перемещений относительно оси  $y$  и  $x$ );
- расчетная критическая нагрузка, приложенная в верхний коннектор, равняется 8800 кг;
- количество неизвестных в расчетной схеме составляет 15007.

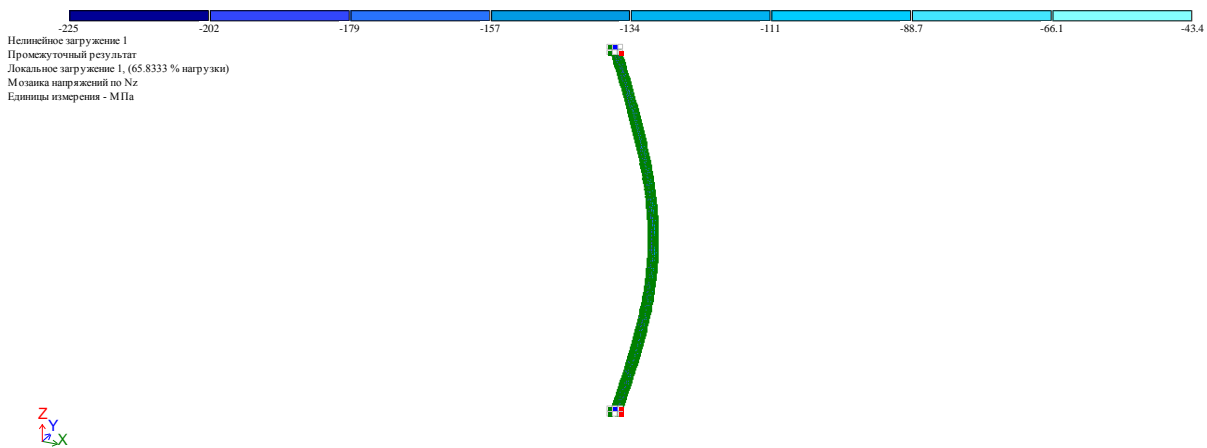


Рисунок 4.13 – Напряжения по Nz

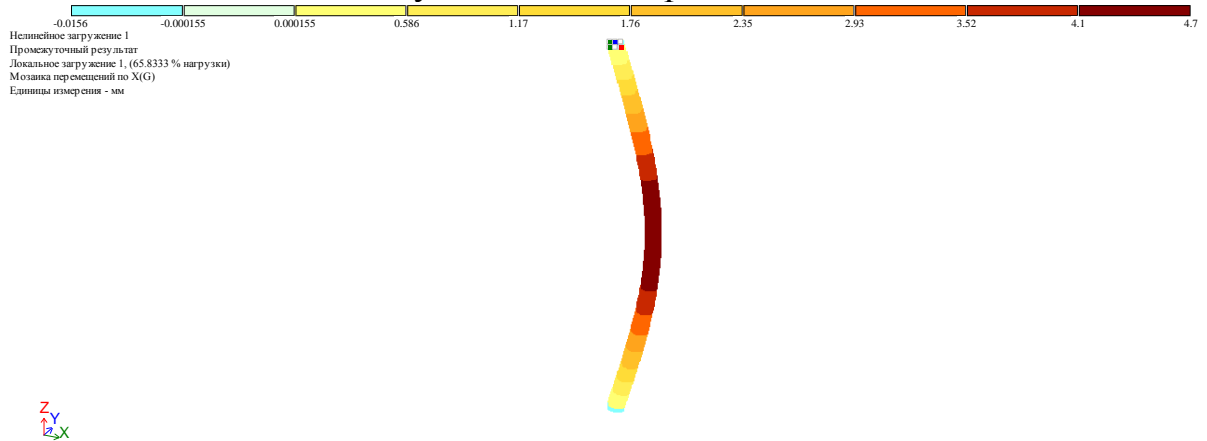


Рисунок 4.14 – Перемещения по x

По результатам численных исследований критическая продольная сила составляет -64,35 кН.

Перед началом проведения экспериментальных исследований, на базе ГОУ ВПО «ДонНАСА» было проведено тарирование тензорезисторов. Для тарировки была принята консольная балка переменного сечения равного сопротивления изгибу (рисунок 4.15, 4.16). В местах изменения сечения были установлены

четыре активных тензорезистора, расположенные вдоль напряженных волокон. На пластине выше были установлены четыре компенсационных тензорезистора (равно количеству активных).

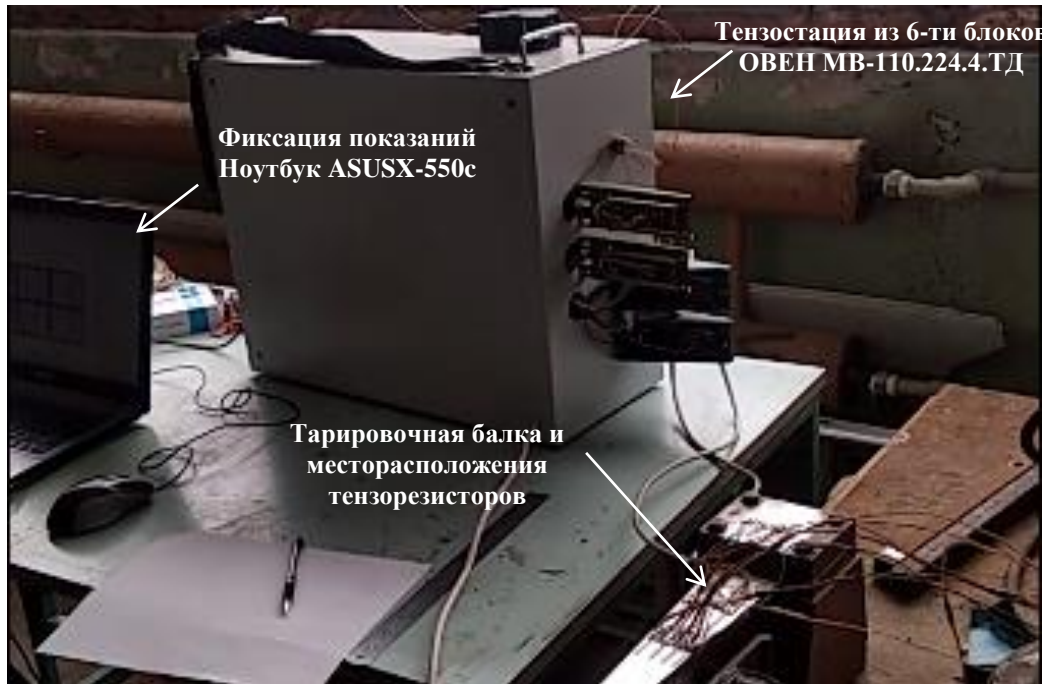


Рисунок 4.15 – Установка для тарировки тензорезисторов



Рисунок 4.16 – Расположение активных и компенсационных тензорезисторов

В таблице 4.6 и на рисунке 4.17 представлены результаты нагрузки-разгрузки балки с показания тензорезисторов по которым можно сделать вывод, что прирост нагрузки в 500 кг (требуемый шаг подачи нагрузки) даст прирост в 3 МПа (3 кгс/см<sup>2</sup>).

Таблица 4.6 – Результаты тарирования тензорезисторов

| №п/п | Время               | Номер активного тензорезистора |      |       |       | Нагрузка (кг) |
|------|---------------------|--------------------------------|------|-------|-------|---------------|
|      |                     | T1                             | T2   | T3    | T4    |               |
| 1    | 13.02.2020 16:20:35 | 0.00                           | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00          |
| 2    | 13.02.2020 16:20:50 | -0.35                          | 0.34 | -0.34 | -0.34 | 10.00         |
| 3    | 13.02.2020 16:21:20 | -0.69                          | 0.68 | -0.68 | -0.68 | 20.00         |
| 4    | 13.02.2020 16:21:40 | -1.04                          | 1.03 | -1.02 | -1.02 | 30.00         |
| 5    | 13.02.2020 16:22:00 | -1.39                          | 1.36 | -1.37 | -1.36 | 40.00         |
| 6    | 13.02.2020 16:22:24 | -1.04                          | 1.04 | -1.02 | -1.01 | 30.00         |
| 7    | 13.02.2020 16:22:39 | -0.70                          | 0.68 | -0.67 | -0.68 | 20.00         |
| 8    | 13.02.2020 16:23:16 | -0.35                          | 0.34 | -0.34 | -0.34 | 10.00         |
| 9    | 13.02.2020 16:23:43 | 0.00                           | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00          |

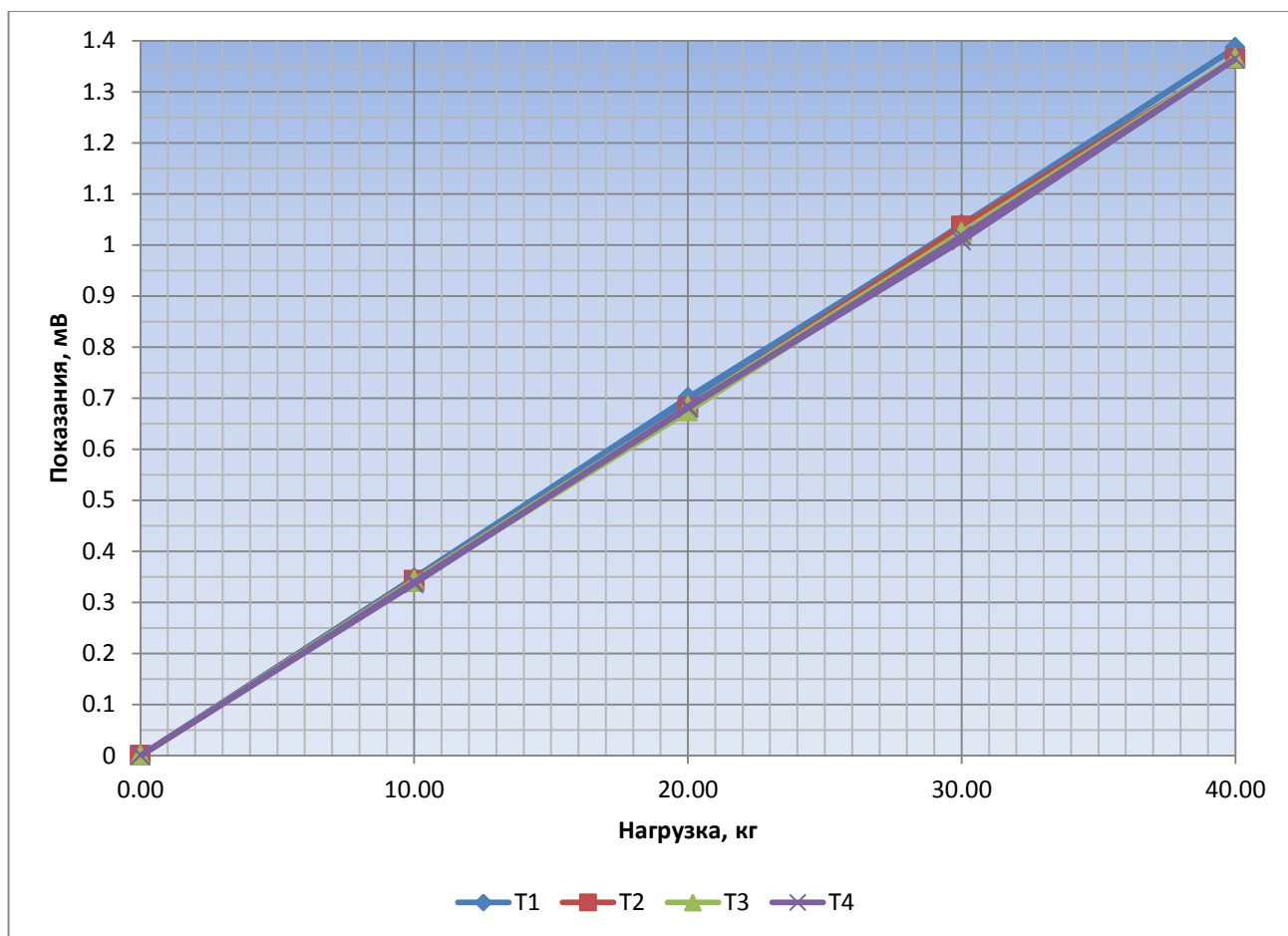


Рисунок 4.17 – Зависимость «Нагрузка-Показания»

#### 4.3. Методика проведения экспериментальных исследований

На основании предварительных результатов расчета были приняты следующие уровни нагрузки на экспериментальные модели:

- Для модели №1: 22755 кг;

- Для модели №2: 8800 кг

Нагрузка на экспериментальные модели будет прикладываться при помощи 100 тонного гидродомкрата ДГ-100 в верхний узел. Для одиночного стержня – домкрат ДГ-20 в нижний узел. Шаг приложения нагрузки для первой модели составляет 550 кг, для второй – 100 кг (41 и 88 ступеней нагружения соответственно). Длительность выдержки каждой ступени составляет 35-55 секунд (для восприятия и распределения нагрузки в конструкции).

Такое решение обосновано тем, что скорость опроса всех активных тензорезисторов, подключенных к тензостанции ОВЕН равно 7-ми опросам в секунду, что позволит максимально четко усреднить все полученные данные и выявить момент распределения и «устаканивания» в конструкции.

Фиксация показаний с тензорезисторов будет записываться с помощью программы MasterSCADA и фиксироваться в текстовый файл. Показания с индикаторов часового типа предполагается записывать вручную и фиксировать на видеокамеры, предварительно синхронизировав время записи.

#### 4.4. Обработка результатов испытаний

Все экспериментальные исследования проводились в лабораторном корпусе №2 кафедры «Металлические конструкции и сооружения» ГОУ ВПО «ДонНАСА» в апреле-ноябре 2020 г. при температуре внутреннего воздуха  $t=+12\pm 3^{\circ}\text{C}$ .

Стержни рассматриваемых моделей были доведены до потери устойчивости (рисунок 4.19), по результатам каждого эксперимента был сформирован массив данных по каждому датчику, и далее проведена процедура процесса обработки результатов, принципиально заключающаяся в следующем:

- данные с датчиков были синхронизированы со временем видеозаписи и определено с точностью до 1-й секунды время потери устойчивости;
- по результатам испытания для каждой группы датчиков были построены графики изменения напряжений по времени наблюдения и определены средние значения напряжений в момент потери устойчивости;

– сравнение экспериментальных и численных значений максимальных напряжений в момент потери устойчивости, а также приращений критического давления.

Определение момента потери устойчивости стержня определяется при помощи с учётом показаний приборов до появления существенных скачков перемещений (напряжений).

Определив точное время потери устойчивости, и убедившись в наличии скачка напряжений, в указанный промежуток времени, согласно электронным таблицам обработки эксперимента, определяется величина основных параметров напряжённого состояние в ближайший зафиксированный момент предшествующие потери устойчивости.

В таблице 4.7 и на рисунках 4.18 а,б представлены результаты экспериментальных исследований.

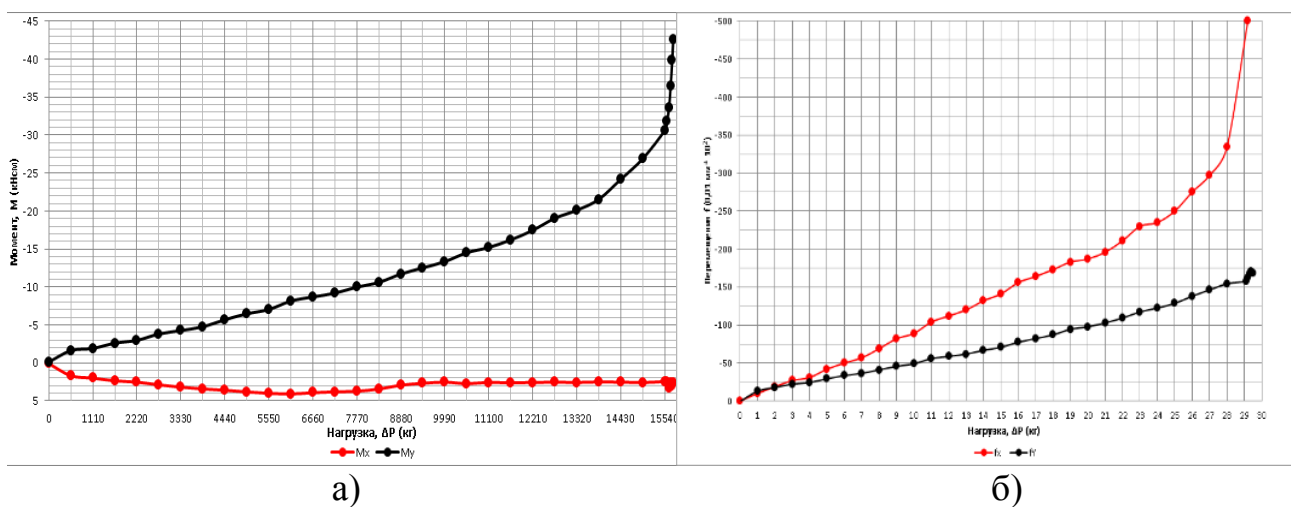


Рисунок 4.18 – Изменение момента в зависимости от приращения ( $M_x - \Delta P$ ,  $M_y - \Delta P$ )

Таблица 4.7 – Массив критических нагрузок (по первому испытанию)

| № п/п | Массив критических нагрузок |                    |                    |                    |                   | Разница          |                  |
|-------|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------|------------------|
|       | $N_{кр(ч)}$ , кН            | $N_{кр(ДБН)}$ , кН | $N_{кр(ТР1)}$ , кН | $N_{кр(ТР2)}$ , кН | $N_{кр(ср)}$ , кН | $\Delta 2-6$ , % | $\Delta 3-6$ , % |
| 1     | 2                           | 3                  | 4                  | 5                  | 6                 | 7                | 8                |
| 1     | -79.545                     | -47                | -65.801            | -80.245            | -73.023           | 8.2              | 35.64            |

Анализ результатов измерений:

– начало развития процесса потери устойчивости наблюдается при

уровне максимальных напряжений по сечению  $\sigma=225-231$  МПа, что свидетельствует о развитии локальных пластических деформаций в месте действия максимального изгибающего момента.

– экспериментально зафиксированный уровень критических напряжений, от действия сжимающей продольной силы составляет  $\sigma_N = 155,2$  МПа, что свидетельствует об общей потере устойчивости для стержня с теоретическим значением гибкости  $\lambda=120$  в упругой стадии работы материала.



Труба 1  
(модель №1)

Труба 2  
(модель №1)

Труба 3  
(модель №2)

Рисунок 4.19 – Вид элемента, потерявшего устойчивость

– начало процесса потери устойчивости стержня произошло при относительном выгибе стержня  $f/l = 1/479$ , что значительно превышает

традиционно закладываемое значение  $f/l = 1/700$ ;

– сопоставление результатов  $N_{кр(ч)}$  и  $N_{кр(эксп)}$  (отличие в пределах 8,2%) позволяет сделать вывод о хорошем совпадении результатов численных и экспериментальных исследований. В свою очередь сопоставление  $N_{кр(эксп)}$  и  $N_{кр(ДБН)}$  (отличие в пределах 35,64%) позволяет сделать вывод о существенном влиянии конструктивных особенностей узловых соединений на несущую способность центрально-сжатого стержня структурного покрытия из условия устойчивости.

Анализ экспериментальных зависимостей приведенных на рисунке (моменты) показывает увеличение изгибающего момента в средней части стержня, обусловленное увеличением стрелы прогиба вплоть до момента потери устойчивости. Показательным являются зависимости на рисунке 4.18 а.б., свидетельствующие о заземлении стержня в узловом соединении и тем самым экспериментально подтверждающие влияние конструктивных особенностей узловых соединений на работу стержня, и в первую очередь, на сокращение его расчетной длины и увеличение несущей способности из условия устойчивости.

Для экспериментального подтверждения влияния узловых соединений выполнено испытание одиночного стержня на устойчивость, конструктивная схема которого максимально приближена к идеализированной схеме центрально-сжатого стержня с шарнирными узловыми закреплениями (Рисунок 4.11-4.12).

Результаты экспериментальных исследований одиночного стержня и сравнения с численными исследованиями приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Массив критических нагрузок (по второму испытанию)

| №<br>п/п | Массив критических нагрузок |                    |                   |                   | Разница          |                  |                  |
|----------|-----------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
|          | $N_{кр(ч)}$ , кН            | $N_{кр(ДБН)}$ , кН | $N_{кр(сп)}$ , кН | $N_{кр(ОС)}$ , кН | $\Delta 2-5$ , % | $\Delta 3-5$ , % | $\Delta 4-5$ , % |
| <b>1</b> | <b>2</b>                    | <b>3</b>           | <b>4</b>          | <b>5</b>          | <b>6</b>         | <b>7</b>         | <b>8</b>         |
| 1        | -64.35                      | -47.2              | -73.023           | -57.41            | 10.78            | 17.78            | 21.038           |

Анализ результатов измерений:

– На основании сопоставления результатов оценки несущей способности одиночного стержня без оформления узловых соединений и несущей



способности стержня в составе структурного блока экспериментально подтверждено существенное влияние конструкции узлового соединения на несущую способность стержня из условия устойчивости ( $\Delta N_{кр(ч)}=19,10\%$ ,  $\Delta N_{кр(эксп)}=21,04\%$ ).

#### 4.5. Выводы по результатам IV-го раздела:

1. По данным проведенного экспериментального исследования подтверждено увеличение несущей способности центрально-сжатого стержня с теоретическим значением  $\lambda=120$  до 36% (по данным численного исследования – до 41%) по сравнению с теоретическим значением критической силы (что объясняется принятой упрощенной диаграммой деформирования стали принятой в соответствии с возможностями ПК ЛИРА-САПР).

2. Приемлемая сходимость результатов критической силы теоретических и экспериментальных исследований (8-11%) позволяет установить адекватность проведенных исследований. В свою очередь, уровень напряжений от сжимающей продольной силы ( $\sigma_N=148-155$  МПа) свидетельствует об общей потере устойчивости для стержня с теоретическим значением гибкости  $\lambda=120$  в упругой стадии работы материала.

3. При общей потере устойчивости стержня в упругой стадии работы материала, уровень максимальных напряжений по сечению в месте излома стержня при потере устойчивости  $\sigma_{max} = 225-231$  МПа, что свидетельствует о развитии локальных пластических деформаций в месте действия максимального изгибающего момента.

4. Сопоставление результатов экспериментальной оценки несущей способности из условия устойчивости одиночного стержня без узловых вставок и стержня с узловыми вставками в составе структурной ячейки подтверждает гипотезу о частичном защемлении стержня в элементах узловых соединений ( $\Delta N_{кр(ч)}=19,10\%$ ,  $\Delta N_{кр(эксп)}=21,04\%$ ).

## «РАЗДЕЛ V. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ НА НЕТИПОВОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ»

### 5.1. Обоснование системы управляющих и варьируемых параметров

Анализируя зависимости, представленные на рисунках 2.4-2.7 во II разделе работы следует отметить следующие закономерности:

- изменение соотношения сторон для покрытия на нетиповом прямоугольном плане в пределах  $a/b = 1.6...2.4$  оказывает влияние на НДС покрытия и приводит к изменению относительного прогиба в пределах 1,5...5,5% по прогибам, и 3...15% - изменению изгибающих моментов;

- гораздо большее значение для изменения параметров НДС имеет изменение нагрузки. При этом следует отметить: изменение основных параметров НДС происходит практически прямо пропорционально изменению нагрузки, что в целом соответствует аналитическим предпосылкам, принятым в теории изгиба тонких пластин, описываемым уравнением Софи Жермен.

### 5.2. Формулировка функции цели

В рамках проводимого исследования предлагается функция цели, предусматривающая минимальную массу конструкции при выполнении ограничений, связанных с требованием обеспечения прочности, устойчивости, жесткости конструкции в пределах изменения варьируемых параметров.

Обоснованием такого подхода может служить тот факт, что в настоящее время стоимость материалов конструкции составляет 40-70% общей стоимости завершеного объекта. Затраты связанные с другими статьями стоимости строительства очень сильно разнятся в зависимости от производителя, его технических и технологических возможностей, и на сегодняшний день, имеют неустоявшиеся границы. В связи с этим предлагается минимизировать теоретическую массу конструкции, вычисляемую по конечным геометрическим параметрам структурных элементов, составляющих конструкцию, что позволяет ее записать в следующем виде:

$$G \rightarrow \min \left[ \rho \left( \sum_{i=1}^n A_i l_i + \sum_{j=1}^m V_j \right) \right] \quad (5.1)$$

где:  $G$  – оптимизируемая масса конструкции,  $\rho$  – плотность стали,  $i = 1 \dots n$  – количество стержневых элементов структурного покрытия,  $A_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -го элемента,  $l_i$  – теоретическая длина  $i$ -го элемента (по центрам узлов),  $j = 1 \dots m$  – количество соединительных узлов-коннекторов,  $V_j$  – объем-нетто (за вычетом отверстий)  $j$ -го коннектора.

Алгоритм оптимизации реализован в виде программного комплекса написанного на высокоуровневом интерпретируемом языке программирования MATLAB. Блок схема методики оптимизации представлена на рисунке 5.1. В качестве переменной «х» алгоритма выступают одновременно «Н» и «Z». Изначально формируется файл с исходными данными в формате .txt, где указывается нагрузка, координаты узлов, геометрические характеристики сечений и связи. Для обеспечения интеграции разработанного программного продукта с современными комплексами автоматического проектирования предусмотрена возможность загрузки вышеперечисленных данных из текстовых файлов генерируемых программами «ЛИРА САПР» и «SCAD». Далее насчитывается сетка точек расположенных на исследуемой поверхности массы (m), где параметры «Н» и «Z» изменяются с заданным шагом. Анализируя полученный массив данных масс конструкции, выбираются три базисные точки для реализации алгоритма Нелдера-Мида. Точка с максимальным значением целевой функции массы (точка 3) отображается через центр отрезка образованного двумя оставшимися точками базиса (точки 1 и 2). Если целевая функция в полученной точке (точка 4) меньше массы в точке 3, то происходит растяжение вычисления (рассчитывается точка 5), отрезок «3-4» удлиняется по направлению точки 4. Если целевая функция массы в точке 4 больше массы в точке 3, но меньше массы в центре отрезка «1-2», выполняется редукция (переопределение точек базиса). Если целевая функция массы в точке 4 больше массы всех предыдущих точек итерации, то выполняется сжатие (точка 5 получается путем отображения точки 4

«внутри» базисного треугольника). После вычисления параметров и массы 5 точки производится анализ полученных вычислений и выбираются три точки с наименьшей целевой функцией массы для следующей итерации. Расчет ведется, пока изменение целевой функции массы на трех итерациях подряд не составит менее 5%. Точка с минимальной функцией массы на последней итерации принимается как наиболее оптимальный вариант конструкции. Далее фиксируются жесткости элементов, геометрия конструкции и выводятся пользователю. После чего расчет останавливается.

При разработке алгоритма оптимального проектирования заданы следующие ограничения:

- исследования проведены для элементов конструкций, выполненных из материала с расчетным сопротивлением равным 240 МПа (Сталь С245 по ГОСТ ТРУБЫ);
- относительная высота изменяется в пределах  $(1/10...1/30)b$ , где  $b$  – короткая сторона плана покрытия, что обусловлено существующими рекомендациями по проектированию структурных конструкций;
- относительная стрела выгиба изменяется в пределах  $(0...1/4.5)b$ , что обусловлено возможностью сохранения в расчетной схеме равномерно распределенной нагрузки на всех этапах оптимального проектирования;
- изменение расчетных нагрузок происходит в диапазоне от 40 до 240 кг/м<sup>2</sup> (нижняя граница соответствует максимальному значению расчетной постоянной нагрузке при отсутствии снеговой нагрузки. Верхняя граница – сумме постоянной и максимальной снеговой нагрузке по [35].
- соотношение сторон в плане принимается в диапазоне от 1/1 до 1/2.8, что объясняется известными сведениями из теории изгиба тонких пластин (максимальная эффективность при соотношении 1/1, практически отсутствие пространственного перераспределения наблюдается при соотношении сторон менее 1/2.5...1/3);

– все стержневые элементы в расчетной схеме конструкции проверялись:

- для растянутых элементов – из условия прочности ( $\sigma \leq R_y$ );
- для центрально-сжатых элементов – из условия прочности и устойчивости в одном из двух вариантов, задаваемых проектировщиком ( $\sigma_{кр} \leq \varphi R_y$  – при расчете по отечественным нормам проектирования, и в соответствии с зависимостью, предложенной автором в III-м разделе работы  $\sigma_{кр} \leq \sigma_{кр}^{расч}$ ).

В рамках предварительно выполненных исследований были выделены параметры проектирования ( $q^*$ ,  $S1-S3$  ( $a/b$ ),  $f/b$ ,  $h/b$ ), оказывающие значительное влияние на несущую способность центрально-сжатых стержней структурных конструкций. Эти параметры можно разделить на две группы:

– Варьируемые параметры: к этой группе относятся параметры, имеющие наибольшее влияние на НДС центрально-сжатых стержней структурных конструкций:

- $f/b$  – соотношение стрелы обратного выгиба покрытия к его меньшей стороне в плане;
- $h/b$  – соотношение высоты покрытия к его меньшей стороне в плане.

Согласно предыдущим исследованиям, наибольшее влияние на НДС центрально-сжатых стержней структурных конструкций оказывает параметр  $f/b$ , что обусловлено перераспределением напряжений в элементах за счет появления общей кривизны покрытия.

– Заданные параметры: к этой группе относятся параметры, которыми предполагается варьирование НДС покрытия:

- $q$  – расчетная нагрузка на покрытие (40 кг/м<sup>2</sup>, 100 кг/м<sup>2</sup>, 160 кг/м<sup>2</sup>, 240 кг/м<sup>2</sup>);
- $b/a$  – соотношение меньшей стороны покрытия в плане к большей (45x45 м, 45x68.4 м, 45x90 м, 45x108 м, 45x126 м).

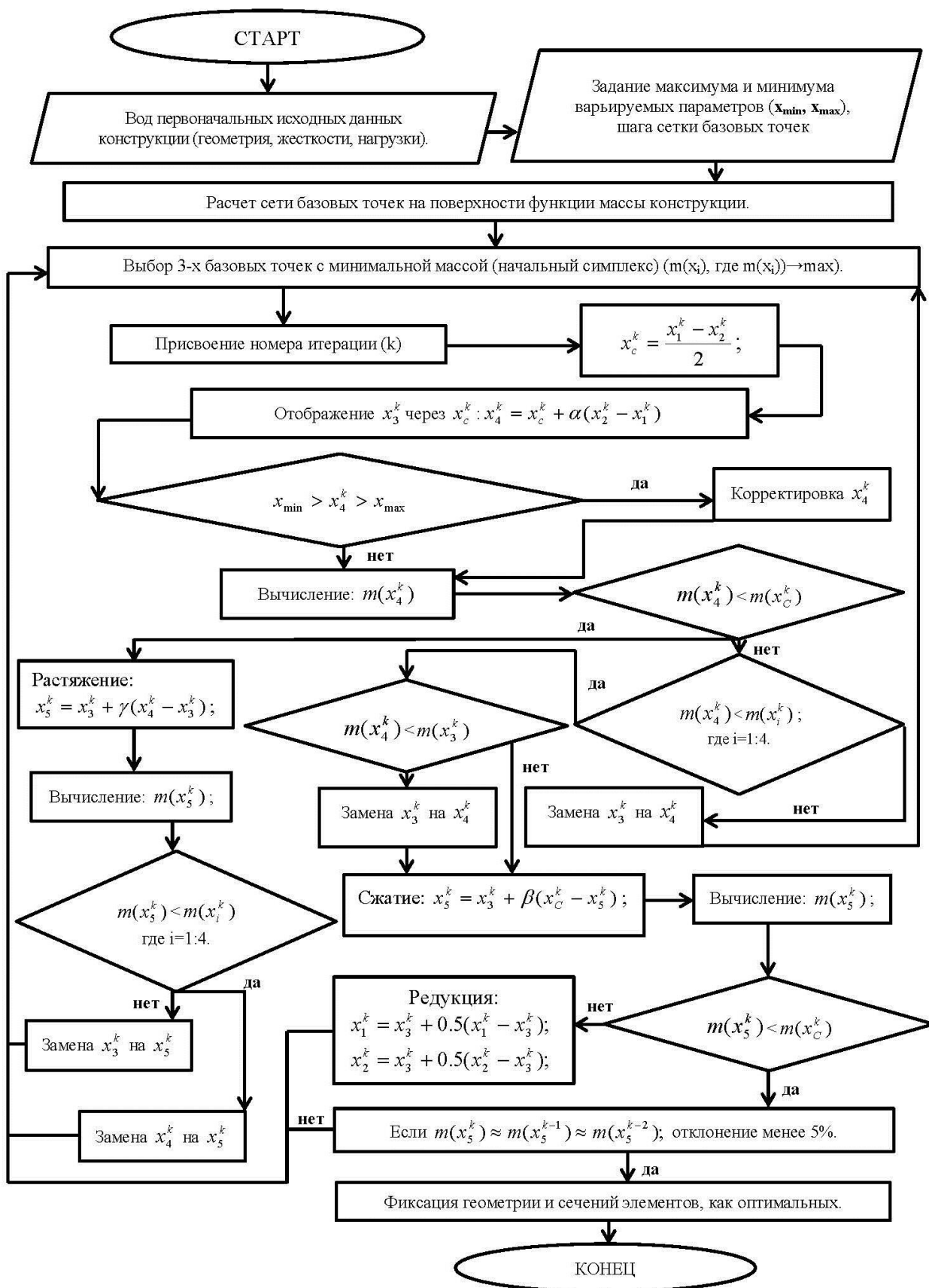


Рисунок 5.1 – Алгоритм оптимизации решетчатой конструкции

### 5.3. Оценка влияния основных параметров проектирования на оптимизацию проектных решений

Для оценки значимости параметров проектирования был проведен анализ данных, представленных на рисунках 5.2-5.9. Основным показателем значимости является удельный вес конструкции покрытия. По указанному в подразделе 5.2. алгоритму была проведена оптимизация по массе конструкции при условии подбора сечений центрально-сжатых элементов по 2-м методикам: классическая методика, предложенная нормами (ДБН) и методика, разработанная в разделе III с помощью аппроксимации кривой (формула 3.4). Используя возможности разработанного алгоритма, оптимизация исходных проектных решений выполнена в 2-х вариантах:

- 1) при сохранении плоской формы исходного проектного решения и поиска оптимального решения путем варьирования 1-го параметра – относительной высоты покрытия ( $h/b$ );
- 2) при искривлении первоначальной плоской формы проектного решения и преобразовании ее в пологую стержневую оболочку с поиском оптимального решения путем варьирования 2-х параметров: относительной высоты покрытия ( $h/b$ ) и относительной стрелы подъема ( $f/b$ ).

#### 5.3.1. Результаты оптимизации исходных решений по одному параметру.

Анализируя исходные данные и полученные в ходе оптимизации по одному параметру различные показатели масс покрытия (Таблица 5.1), в программном комплексе Microsoft EXCEL были созданы зависимости «Удельная масса покрытия – соотношение сторон в плане» и «Удельная масса покрытия – расчетная нагрузка, представленные в приложении Б (Рисунок Б.1-Б.9).

В таблице 5.2. представлены значения разницы показаний удельной массы конструкции в зависимости от расчетной нагрузки и соотношения сторон покрытия в плане.

Таблица 5.1 – Исходные данные для оценки параметров проектирования на оптимизацию проектных решений по одному параметру и полученные результаты

| Исходные данные |                         |      |      | Результаты оптимизации |                   |                       |                     |                        | Анализ полученных результатов        |                                    |                                       |                      |                  |                   |                    |                     |
|-----------------|-------------------------|------|------|------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| № п/п           | q, (кг/м <sup>2</sup> ) | b/a  | b, м | a, м                   | A, м <sup>2</sup> | m <sub>ДБН</sub> , кг | m <sub>м</sub> , кг | m <sub>б.о.</sub> , кг | G <sub>ДБН</sub> , кг/м <sup>2</sup> | G <sub>м</sub> , кг/м <sup>2</sup> | G <sub>б.о.</sub> , кг/м <sup>2</sup> | A, (м <sup>2</sup> ) | h <sub>ДБН</sub> | h <sub>перг</sub> | h/b <sub>ДБН</sub> | h/b <sub>перг</sub> |
| 1               | 2                       | 3    | 4    | 5                      | 6                 | 7                     | 8                   | 9                      | 10                                   | 11                                 | 12                                    | 13                   | 14               | 15                | 16                 | 17                  |
| 1               | 40                      | 1.00 | 45   | 45                     | 2025              | 20587.4               | 20587.4             | 22674.1                | 10.17                                | 10.17                              | 11.20                                 | 2025                 | 1.523            | 1.523             | 0.03               | 0.03                |
| 2               | 40                      | 0.63 |      | 68                     | 3078              | 29085.2               | 29051.8             | 30834.7                | 9.45                                 | 9.44                               | 10.02                                 | 2025                 | 1.523            | 1.523             | 0.03               | 0.03                |
| 3               | 40                      | 0.50 |      | 90                     | 4050              | 38449.2               | 38351.4             | 40822.8                | 9.49                                 | 9.47                               | 10.08                                 | 2025                 | 1.523            | 1.523             | 0.03               | 0.03                |
| 4               | 40                      | 0.42 |      | 108                    | 4860              | 47502.4               | 47455.3             | 50160.8                | 9.77                                 | 9.76                               | 10.32                                 | 2025                 | 1.688            | 1.523             | 0.04               | 0.03                |
| 5               | 40                      | 0.36 |      | 126                    | 5670              | 54333.0               | 54325.9             | 57597.1                | 9.58                                 | 9.58                               | 10.16                                 | 3078                 | 1.523            | 1.605             | 0.03               | 0.04                |
| 6               | 100                     | 1.00 |      | 45                     | 2025              | 24547.0               | 24532.5             | 25155.6                | 12.12                                | 12.11                              | 12.42                                 | 2025                 | 2.180            | 1.934             | 0.05               | 0.04                |
| 7               | 100                     | 0.63 |      | 68                     | 3078              | 35240.0               | 35112.2             | 35591.7                | 11.45                                | 11.41                              | 11.56                                 | 2025                 | 2.262            | 2.344             | 0.05               | 0.05                |
| 8               | 100                     | 0.50 |      | 90                     | 4050              | 47638.4               | 47402.0             | 47856.3                | 11.76                                | 11.70                              | 11.82                                 | 2025                 | 2.508            | 2.508             | 0.06               | 0.06                |
| 9               | 100                     | 0.42 |      | 108                    | 4860              | 58837.2               | 58498.3             | 59245.3                | 12.11                                | 12.04                              | 12.19                                 | 2025                 | 2.508            | 2.508             | 0.06               | 0.06                |
| 10              | 100                     | 0.36 |      | 126                    | 5670              | 68998.5               | 68475.6             | 69585.1                | 12.17                                | 12.08                              | 12.27                                 | 3078                 | 2.508            | 2.508             | 0.06               | 0.06                |
| 11              | 160                     | 1.00 |      | 45                     | 2025              | 28375.3               | 28146.4             | 28600.3                | 14.01                                | 13.90                              | 14.12                                 | 2025                 | 2.508            | 2.508             | 0.06               | 0.06                |
| 12              | 160                     | 0.63 |      | 68                     | 3078              | 41165.6               | 40512.9             | 41305.8                | 13.37                                | 13.16                              | 13.42                                 | 2025                 | 2.672            | 2.672             | 0.06               | 0.06                |
| 13              | 160                     | 0.50 |      | 90                     | 4050              | 56136.7               | 55188.7             | 56225.2                | 13.86                                | 13.63                              | 13.88                                 | 2025                 | 2.836            | 2.672             | 0.06               | 0.06                |
| 14              | 160                     | 0.42 |      | 108                    | 4860              | 68868.9               | 67577.2             | 69075.0                | 14.17                                | 13.90                              | 14.21                                 | 2025                 | 2.836            | 2.672             | 0.06               | 0.06                |
| 15              | 160                     | 0.36 |      | 126                    | 5670              | 82460.3               | 80698.0             | 82641.9                | 14.54                                | 14.23                              | 14.58                                 | 3078                 | 2.672            | 2.672             | 0.06               | 0.06                |
| 16              | 240                     | 1.00 |      | 45                     | 2025              | 33323.5               | 32861.9             | 33275.8                | 16.46                                | 16.23                              | 16.43                                 | 2025                 | 2.734            | 2.836             | 0.06               | 0.06                |
| 17              | 240                     | 0.63 |      | 68                     | 3078              | 49262.6               | 48648.7             | 49899.6                | 16.00                                | 15.81                              | 16.21                                 | 2025                 | 3.000            | 3.000             | 0.07               | 0.07                |
| 18              | 240                     | 0.50 |      | 90                     | 4050              | 67423.6               | 66389.5             | 68278.6                | 16.65                                | 16.39                              | 16.86                                 | 2025                 | 3.820            | 3.000             | 0.08               | 0.07                |
| 19              | 240                     | 0.42 |      | 108                    | 4860              | 83715.7               | 82062.1             | 85059.5                | 17.23                                | 16.89                              | 17.50                                 | 2025                 | 3.656            | 3.492             | 0.08               | 0.08                |
| 20              | 240                     | 0.36 |      | 126                    | 5670              | 99005.6               | 97342.2             | 100482.1               | 17.46                                | 17.17                              | 17.72                                 | 3078                 | 3.656            | 3.328             | 0.08               | 0.07                |



Таблица 5.2 – Сравнение показателей удельной массы покрытия

| № п/п | b/a   | q,<br>(кг/м <sup>2</sup> ) | G <sub>дбн</sub> | G <sub>м</sub> | G <sub>б.о</sub> | δ5-6 | δ5-4 |
|-------|-------|----------------------------|------------------|----------------|------------------|------|------|
| 1     | 2     | 3                          | 4                | 5              | 6                | 7    | 8    |
| 1     | 1     | 40                         | 10.17            | 10.17          | 11.20            | -9.2 | 0.0  |
| 2     | 1     | 100                        | 12.12            | 12.11          | 12.42            | -2.5 | -0.1 |
| 3     | 1     | 160                        | 14.01            | 13.90          | 14.12            | -1.6 | -0.8 |
| 4     | 1     | 240                        | 16.46            | 16.23          | 16.43            | -1.2 | -1.4 |
| 5     | 1/1.6 | 40                         | 9.45             | 9.44           | 10.02            | -5.8 | -0.1 |
| 6     | 1/1.6 | 100                        | 11.45            | 11.41          | 11.56            | -1.3 | -0.3 |
| 7     | 1/1.6 | 160                        | 13.37            | 13.16          | 13.42            | -1.9 | -1.6 |
| 8     | 1/1.6 | 240                        | 16.00            | 15.81          | 16.21            | -2.5 | -1.2 |
| 9     | 1/2   | 40                         | 9.49             | 9.47           | 10.08            | -6.1 | -0.2 |
| 10    | 1/2   | 100                        | 11.76            | 11.70          | 11.82            | -1.0 | -0.5 |
| 11    | 1/2   | 160                        | 13.86            | 13.63          | 13.88            | -1.8 | -1.7 |
| 12    | 1/2   | 240                        | 16.65            | 16.39          | 16.86            | -2.8 | -1.6 |
| 13    | 1/2.4 | 40                         | 9.77             | 9.76           | 10.32            | -5.4 | -0.1 |
| 14    | 1/2.4 | 100                        | 12.11            | 12.04          | 12.19            | -1.2 | -0.6 |
| 15    | 1/2.4 | 160                        | 14.17            | 13.90          | 14.21            | -2.2 | -1.9 |
| 16    | 1/2.4 | 240                        | 17.23            | 16.89          | 17.50            | -3.5 | -2.0 |
| 17    | 1/2.8 | 40                         | 9.58             | 9.58           | 10.16            | -5.7 | 0.0  |
| 18    | 1/2.8 | 100                        | 12.17            | 12.08          | 12.27            | -1.5 | -0.7 |
| 19    | 1/2.8 | 160                        | 14.54            | 14.23          | 14.58            | -2.4 | -2.1 |
| 20    | 1/2.8 | 240                        | 17.46            | 17.17          | 17.72            | -3.1 | -1.7 |

Анализируя полученные зависимости, следует отметить следующие закономерности:

1) При создании отечественных норм проектирования и рекомендаций по проектированию структурных конструкций в части назначения относительной высоты покрытия (1/20...1/30) во главу угла ставилось достаточно высокое значение расчетной нагрузки, что указывает на маленький процент (1,2 %) разницы с результатами оптимизированной конструкции, сечение которых подбиралось согласно методике, предложенной в главе III. Как только расчетная нагрузка становится достаточно небольшой (40 кг/м<sup>2</sup>), разница вырастает до 9,2 %.

2) На примере малой нагрузки следует отметить влияние соотношения сторон в плане на показатели оптимизации (при соотношении 1/1 – 9,2%, при

соотношении 1/2.8 – 5.7%). Такая разница обусловлена постепенным выключением из работы стороны плана, которая подвергается удлинению.

### 5.3.2. Результаты оптимизации исходных решений по двум параметрам.

Анализируя исходные данные и полученные в ходе оптимизации по двум параметрам различные показатели масс покрытия (Таблица 5.4), в программном комплексе Microsoft EXCEL были созданы зависимости «Удельная масса покрытия – соотношение сторон в плане» и «Удельная масса покрытия – расчетная нагрузка, представленные в приложении Б (Рисунок Б.10-Б.18).

В таблице 5.3. представлены значения разницы показаний удельной массы конструкции в зависимости от расчетной нагрузки и соотношения сторон покрытия в плане.

Таблица 5.3 – Сравнение показателей удельной массы покрытия и относительной стрелы выгиба

| № п/п | q, (кг/м <sup>2</sup> ) | b/a   | G <sub>дбн</sub> | G <sub>м</sub> | G <sub>б.о</sub> | δ5-6  | δ5-4 | f/b <sub>дбн</sub> | f/b <sub>перг</sub> |
|-------|-------------------------|-------|------------------|----------------|------------------|-------|------|--------------------|---------------------|
| 1     | 2                       | 3     | 4                | 5              | 6                | 7     | 8    | 9                  | 10                  |
| 1     | 40.00                   | 1     | 9.68             | 9.68           | 11.20            | -13.6 | 0.0  | 0.17               | 0.17                |
| 2     | 40.00                   | 1/1.6 | 8.89             | 8.89           | 10.02            | -11.3 | 0.0  | 0.22               | 0.22                |
| 3     | 40.00                   | 1/2   | 9.03             | 9.03           | 10.08            | -10.4 | 0.0  | 0.22               | 0.22                |
| 4     | 40.00                   | 1/2.4 | 9.30             | 9.30           | 10.32            | -9.9  | 0.0  | 0.22               | 0.22                |
| 5     | 40.00                   | 1/2.8 | 9.13             | 9.13           | 10.16            | -10.1 | 0.0  | 0.22               | 0.22                |
| 6     | 100.00                  | 1     | 10.88            | 10.75          | 12.42            | -13.4 | -1.2 | 0.22               | 0.19                |
| 7     | 100.00                  | 1/1.6 | 10.19            | 10.05          | 11.56            | -13.1 | -1.4 | 0.22               | 0.22                |
| 8     | 100.00                  | 1/2   | 10.31            | 10.04          | 11.82            | -15.1 | -2.6 | 0.22               | 0.22                |
| 9     | 100.00                  | 1/2.4 | 10.57            | 10.16          | 12.19            | -16.7 | -3.9 | 0.22               | 0.22                |
| 10    | 100.00                  | 1/2.8 | 10.61            | 10.31          | 12.27            | -16.0 | -2.8 | 0.22               | 0.22                |
| 11    | 160.00                  | 1     | 11.90            | 11.55          | 14.12            | -18.2 | -2.9 | 0.22               | 0.19                |
| 12    | 160.00                  | 1/1.6 | 11.33            | 10.97          | 13.42            | -18.3 | -3.2 | 0.22               | 0.22                |
| 13    | 160.00                  | 1/2   | 11.29            | 10.86          | 13.88            | -21.8 | -3.8 | 0.22               | 0.22                |
| 14    | 160.00                  | 1/2.4 | 11.32            | 10.82          | 14.21            | -23.9 | -4.4 | 0.22               | 0.22                |
| 15    | 160.00                  | 1/2.8 | 11.56            | 11.13          | 14.58            | -23.7 | -3.7 | 0.22               | 0.22                |
| 16    | 240.00                  | 1     | 13.14            | 12.74          | 16.43            | -22.5 | -3.0 | 0.21               | 0.22                |
| 17    | 240.00                  | 1/1.6 | 12.77            | 12.05          | 16.21            | -25.7 | -5.6 | 0.22               | 0.22                |
| 18    | 240.00                  | 1/2   | 12.92            | 12.08          | 16.86            | -28.4 | -6.5 | 0.22               | 0.22                |
| 19    | 240.00                  | 1/2.4 | 13.06            | 12.28          | 17.50            | -29.8 | -6.0 | 0.22               | 0.22                |
| 20    | 240.00                  | 1/2.8 | 13.14            | 12.50          | 17.72            | -29.5 | -4.9 | 0.22               | 0.22                |

Таблица 5.4 – Исходные данные для оценки параметров проектирования на оптимизацию проектных решений по двум параметру и полученные результаты

| Исходные данные |                         |      |     |     |       |                       |                     |                        |                          |                        |                           |                                  |                  |                   |                    |                     |
|-----------------|-------------------------|------|-----|-----|-------|-----------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| № п/п           | q, (кг/м <sup>2</sup> ) | b/a  | b,м | a,м | A, м2 | m <sub>ДБН</sub> , кг | m <sub>м</sub> , кг | m <sub>б.о.</sub> , кг | G <sub>ДБН</sub> , кг/м2 | G <sub>м</sub> , кг/м2 | G <sub>б.о.</sub> , кг/м2 | A <sub>2</sub> (м <sup>2</sup> ) | h <sub>ДБН</sub> | h <sub>регр</sub> | f/b <sub>ДБН</sub> | f/b <sub>регр</sub> |
| 1               | 2                       | 3    | 4   | 5   | 6     | 7                     | 8                   | 9                      | 10                       | 11                     | 12                        | 13                               | 14               | 15                | 16                 | 17                  |
| 1               | 40                      | 1.00 | 45  | 45  | 2025  | 19610.1               | 19610.9             | 22674.1                | 9.68                     | 9.68                   | 11.20                     | 2025                             | 7.499            | 7.499             | 0.17               | 0.17                |
| 2               | 40                      | 0.63 |     | 68  | 3078  | 27360.6               | 27360.6             | 30834.7                | 8.89                     | 8.89                   | 10.02                     | 2025                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 3               | 40                      | 0.50 |     | 90  | 4050  | 36591.5               | 36591.5             | 40822.8                | 9.03                     | 9.03                   | 10.08                     | 2025                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 4               | 40                      | 0.42 |     | 108 | 4860  | 45188.7               | 45188.7             | 50160.8                | 9.30                     | 9.30                   | 10.32                     | 2025                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 5               | 40                      | 0.36 |     | 126 | 5670  | 51771.3               | 51771.3             | 57597.1                | 9.13                     | 9.13                   | 10.16                     | 3078                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 6               | 100                     | 1.00 |     | 45  | 2025  | 22024.4               | 21775.7             | 25155.6                | 10.88                    | 10.75                  | 12.42                     | 2025                             | 10               | 8.332             | 0.22               | 0.19                |
| 7               | 100                     | 0.63 |     | 68  | 3078  | 31370.8               | 30921.4             | 35591.7                | 10.19                    | 10.05                  | 11.56                     | 2025                             | 10               | 9.791             | 0.22               | 0.22                |
| 8               | 100                     | 0.50 |     | 90  | 4050  | 41748.6               | 40680.9             | 47856.3                | 10.31                    | 10.04                  | 11.82                     | 2025                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 9               | 100                     | 0.42 |     | 108 | 4860  | 51382.0               | 49394.9             | 59245.3                | 10.57                    | 10.16                  | 12.19                     | 2025                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 10              | 100                     | 0.36 |     | 126 | 5670  | 60162.0               | 58432.9             | 69585.1                | 10.61                    | 10.31                  | 12.27                     | 3078                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 11              | 160                     | 1.00 |     | 45  | 2025  | 24100.0               | 23384.0             | 28600.3                | 11.90                    | 11.55                  | 14.12                     | 2025                             | 10               | 8.749             | 0.22               | 0.19                |
| 12              | 160                     | 0.63 |     | 68  | 3078  | 34879.1               | 33750.5             | 41305.8                | 11.33                    | 10.97                  | 13.42                     | 2025                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 13              | 160                     | 0.50 |     | 90  | 4050  | 45731.2               | 43972.2             | 56225.2                | 11.29                    | 10.86                  | 13.88                     | 2025                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 14              | 160                     | 0.42 |     | 108 | 4860  | 55012.6               | 52602.2             | 69075.0                | 11.32                    | 10.82                  | 14.21                     | 2025                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 15              | 160                     | 0.36 |     | 126 | 5670  | 65564.4               | 63100.2             | 82641.9                | 11.56                    | 11.13                  | 14.58                     | 3078                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 16              | 240                     | 1.00 |     | 45  | 2025  | 26598.6               | 25806.2             | 33275.8                | 13.14                    | 12.74                  | 16.43                     | 2025                             | 9.285            | 10                | 0.21               | 0.22                |
| 17              | 240                     | 0.63 |     | 68  | 3078  | 39301.6               | 37104.2             | 49899.6                | 12.77                    | 12.05                  | 16.21                     | 2025                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 18              | 240                     | 0.50 |     | 90  | 4050  | 52325.1               | 48926.9             | 68278.6                | 12.92                    | 12.08                  | 16.86                     | 2025                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 19              | 240                     | 0.42 |     | 108 | 4860  | 63470.0               | 59663.0             | 85059.5                | 13.06                    | 12.28                  | 17.50                     | 2025                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |
| 20              | 240                     | 0.36 |     | 126 | 5670  | 74519.3               | 70885.1             | 100482.1               | 13.14                    | 12.50                  | 17.72                     | 3078                             | 10               | 10                | 0.22               | 0.22                |

Анализируя полученные зависимости, следует отметить следующие закономерности:

*По одному параметру:*

– При создании отечественных норм проектирования и рекомендаций по проектированию структурных конструкций в части назначения относительной высоты покрытия ( $1/20 \dots 1/30$ ) во главу угла ставилось достаточно высокое значение расчетной нагрузки, что указывает на маленький процент (1,2 %) разницы с результатами оптимизированной конструкции, сечение которых подбиралось согласно методике, предложенной в главе III. Как только расчетная нагрузка становится достаточно небольшой ( $40 \text{ кг/м}^2$ ), разница вырастает до 9,2 %.

– На примере малой нагрузки следует отметить влияние соотношения сторон в плане на показатели оптимизации (при соотношении  $1/1$  – 9,2%, при соотношении  $1/2.8$  – 5.7%). Такая разница обусловлена постепенным выключением из работы стороны плана, которая подвергается удлинению.

*По двум параметрам:*

– При включении в оптимизацию второго параметра (стрелы подъема покрытия), на понижении металлоёмкости покрытия сразу же влияет и расчетная нагрузка и удлинение одной из сторон в плане. Таким образом, минимальная разница между оптимизируемым покрытием по заданной в III-й главе методике и не оптимизируемым покрытием 9,9%. Максимальная разница – 29,8%.

### 5.3.3. Регрессионный анализ по одному и двум параметрам.

Из зависимостей, представленных в приложении Б на рисунках Б.1-Б.18, был сформулирован массив данных для оценки влияния принятых параметров проектирования на результативный показатель по удельному весу покрытия  $G$ , относительной высоте покрытия  $h/b$  и соотношению стрелы выгиба к короткой стороне пролета покрытия  $f/b$ .

Статистическая обработка массива данных выполняется с помощью функции «ЛИНЕЙН» (множественная линейная регрессия) в программе Microsoft

EXCEL 2010. В таблицах 5.1-5.4 и в приложении Б на рисунках Б.1-Б.8 представлен массив начальных данных, принятых для регрессионного анализа. Поиск искомой функции для значения удельного веса покрытия (относительной высоты покрытия и относительной стрелы выгиба) находим по формуле для множественной линейной регрессии:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (5.2)$$

где  $y$  – результирующий показатель ( $G_{\text{расч}}$ ), ( $h/b_{\text{расч}}$ ), ( $f/b_{\text{расч}}$ ), ;

$x_1$  – значение нагрузки на покрытие ( $q$ );

$x_2$  – соотношение сторон покрытия в плане ( $a/b$ );

$b_1, b_2$  – искомые коэффициенты.

Результаты полученных регрессионных зависимостей представлены на рисунках Б.19-Б.26 в приложении Б. В таблице 5.5 представлены все 8 результирующих формул, позволяющих на основании варьируемых параметров проектирования ( $x1-q_{\text{расч}}$ ,  $x2-a/b$ ) вычислить оптимальные параметры конструкции.

5.4. Влияние податливости опор на оптимальные геометрические параметры структурных покрытий на прямоугольном нетиповом плане

5.4.1. Характеристика податливости опор (коэффициент  $k$ ) и его значимость  
 Как было оговорено во II-м разделе представленной работы, для решения задачи тонкой пластины шарнирно закрепленной по контуру и нагруженной равномерно распределенной нагрузкой используется уравнение Софи-Жермен (2.1). Однако, учитывая, что уравнение (2.1) зависит лишь от величины вертикальных перемещений ( $w$ ), задаваемых в качестве аппроксимирующей функции, то в данном случае не представляется возможности зафиксировать различие между шарнирно-неподвижным и шарнирно-подвижным опиранием краев пластины. В связи с этим, чтобы установить зависимость основных параметров НДС пластины от податливости опор в горизонтальной плоскости, предлагается ввести в качестве параметра для установления указанных зависимостей величину  $k$  (формула 5.3), которая для большинства фактических конструктивных решений

Таблица 5.5 – Результирующие формулы регрессионных зависимостей

| $y = b_0 \pm b_1x_1 \pm b_2x_2$   |   |             |
|---|---|-------------|
| где $y$ – искомый показатель; $x_1$ – расчетная нагрузка на покрытие; $x_2$ – соотношение сторон покрытия в плане; $b_0, b_1, b_2$ – вспомогательные коэффициенты |   |             |
| Формула   | Описание  | Коэф. корр. |
| $G_n=8,56004+0,03523*q-0.38389*a/b$   | Удельная масса, вычисленная по оптимальной высоте покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам                        | 0.99007     |
| $G_n=8,52905+0,03384*q-0.2448*a/b$  | Удельная масса, вычисленная по оптимальной высоте покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по предложенной методике.                                    | 0.99004     |
| $h/b_n=0,03809+0,00019*q-0.0138*a/b$  | Относительная высота, вычисленная по оптимальной высоте покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам                  | 0.91866     |
| $h/b_n=0,0393+0,00018*q-0.0161*a/b$   | Относительная высота, вычисленная по оптимальной высоте покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по предложенной методике                               | 0.91912     |
| $G_n=8,24686+0,01873*q+0,47052*a/b$   | Удельная масса, вычисленная по оптимальной высоте и стреле выгиба покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам        | 0.98861     |
| $G_n=8,20306+0,01541*q+0.73692*a/b$   | Удельная масса, вычисленная по оптимальной высоте и стреле выгиба покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по предложенной методике.                    | 0.98379     |
| $h/b_n=0,22617+0,0000034*q-0.0234*a/b$  | Относительная высота, вычисленная по оптимальным высоте и стреле выгиба покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам. | 0.54018     |
| $h/b_n=0,23334+0,0000046*q-0.0429*a/b$  | Относительная высота, вычисленная по оптимальной высоте и стреле выгиба покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по предложенной методике.              | 0.76918     |

зависит от соотношения изгибных жесткостей пролетной и опорной части структурного покрытия:

$$k = \frac{D}{EI} \quad (5.3)$$

где  $D$  – цилиндрическая жесткость плиты, вычисляемая по [91] ( $D = 0,4K$ ),  $кНсм^2$ ;

$K$  – продольная жесткость плиты ( $K = ESA_{\text{в.п.}} \cdot \frac{tg^2 \alpha}{1 + A_{\text{в.п.}}/A_{\text{н.п.}}}$ ),  $кНсм^2$ ;

$E$  – модуль упругости стали,  $кН/см^2$ ;

$S$  – длина поясных стержней (модуль),  $см$ ;

$A_{\text{в.п.}}, A_{\text{н.п.}}$  – площади сечений верхнего и нижнего поясов,  $см^2$ ;

$\alpha$  – угол наклона раскосов к горизонтальной плоскости.

#### 5.4.2. Предварительные выводы о влиянии коэффициента $k$

Ссылаясь на ранние исследования авторов [58, 59] следует отметить следующие особенности влияния податливости опор на НДС структурной конструкции, а именно:

- При переходе от плоской схемы к пространственной в виде полой оболочки, требуемое значение начальной стрелы выгиба составляет  $f/l=1/27$ , при которой обеспечивается возможность использования стандартных элементов типа МАРХИ, для полой оболочки неподвижно закрепленной по контуру.

- Результаты исследования НДС конструкции, полученные путем «вспарушивания», показали, что «вспарушивание» является эффективным методом регулирования параметров НДС при условии «жесткого защемления» конструкции. При проектировании структурного покрытия на упруго-податливых опорах метод «вспарушивания» является наиболее эффективным при соотношении  $h/l=1/50$ . При этом такое соотношение высоты покрытия к пролету приводит к повышенной гибкости покрытия, что в дальнейшем требует уточняющих расчетов для такого класса покрытий с учетом геометрической нелинейности.

- Установленные зависимости « $k - w/L$ » и « $k - N/[N]$ » имеют нелинейный характер и позволяют зафиксировать существенное влияние податливости опорных конструкций для покрытий с малой относительной высотой покрытия  $(1/40)L \dots (1/50)L$ . Условная граница, при которой влияние податливости опорных конструкций на основные параметры напряженно-деформированного состояния можно считать незначительным, составляет  $(h/l \approx (1/17 \dots 1/20)L)$  при  $k \approx 12$ .

Вместе с тем сформулированные предварительные выводы подчеркивают влияние податливости опор на напряженно-деформированное состояние структурного покрытия, а также рекомендуют значения основных геометрических параметров конструкции покрытия, назначаемых при проектировании. При этом сформулированные параметры обеспечивают использование типовых конструктивных элементов узловых соединений, применяемых в системе МАРХИ, однако не решают основную задачу данной работы – назначение основных параметров проектирования, обеспечивающих оптимальных расход стали для проектируемого покрытия на нетиповом прямоугольном плане в зависимости от различной податливости опорных конструкций в горизонтальной плоскости.

Для этой цели на примере большепролетного покрытия на прямоугольном нетиповом плане размером 45x90 м в диапазоне действующих расчетных нагрузок 40...240 кг/м<sup>2</sup> при различных соотношениях изгибной жесткости пролетной части покрытия и опорных конструкций. Это соотношение предлагается оценивать с помощью уточненного безразмерного параметра  $k_1$  (формула 5.4):

$$k_1 = \frac{EI}{Db} \quad (5.4)$$

где  $b$  – шаг колонн в поперечном направлении;

#### 5.4.3. Результаты численного эксперимента.

В таблице 5.6 представлена матрица планирования численного эксперимента, на рисунке 5.2 – расчетная схема покрытия.

Таблица 5.6 – Матрица планирования численного эксперимента

| № п/п | Варьируемые параметры |     |
|-------|-----------------------|-----|
|       | $k_1$                 | $q$ |
| 1     | 2                     | 3   |
| 1     | 10/1                  | 40  |
| 2     | $\infty$              | 100 |
| 3     | 1/1                   | 160 |
| 4     | 10/1                  | 240 |



Оптимизационный расчет покрытия выполнялся по доработанной версии программы оптимизационного расчета, приведенной в разделе V в библиотеку конечных элементов которой введены сжато-(растянуто) изогнутые конечные элементы опорных конструкций. При этом, с целью сопоставимости результатов ранее выполненных расчетов, при подсчете функции цели на металлоемкость опорных конструкций не учитывалась.

Результаты численного эксперимента представлены в таблице 5.7 и на рисунках 5.3-5.5:

1. Учет податливости опор по сравнению с результатами расчета на неподвижном опорном контуре приводит к следующим результатам:

- Для удельной металлоемкости покрытия  $G$  (рисунок 5.3):
  - незначительному увеличению показателя (до 6% в рассматриваемом диапазоне нагрузок);
  - увеличение расчетной нагрузки в 6 раз (с 40 до 240 кг/м<sup>2</sup>) сопровождается увеличению металлоемкости до 35%.
- Для относительного выгиба  $f/b$  (рисунок 5.4):
  - Достижение оптимальной металлоемкости наблюдается при переходе от плоской конструктивной формы к криволинейной в виде двухпоясной стержневой оболочки положительной гауссовой кривизны с максимальной анализируемой стрелой подъема в центре  $f/b=1/4,5\approx 0,222$ .
- Для относительной высоты покрытия  $h/b$  (рисунок 5.5):
  - Учет податливости опорных конструкций вызывает необходимость увеличения относительной высоты покрытия с минимальной высотой  $h/b=0,015\approx 1/64$ , характерной для неподвижного контура, до  $h/b=0,088\approx 1/11$  – для податливого. При этом, несмотря на увеличение высоты покрытия наблюдается либо совершенно незначительное увеличение, либо при малых нагрузках даже некоторое снижение (до 1,1%) массы покрытия за счет снижения усилий в поясах.

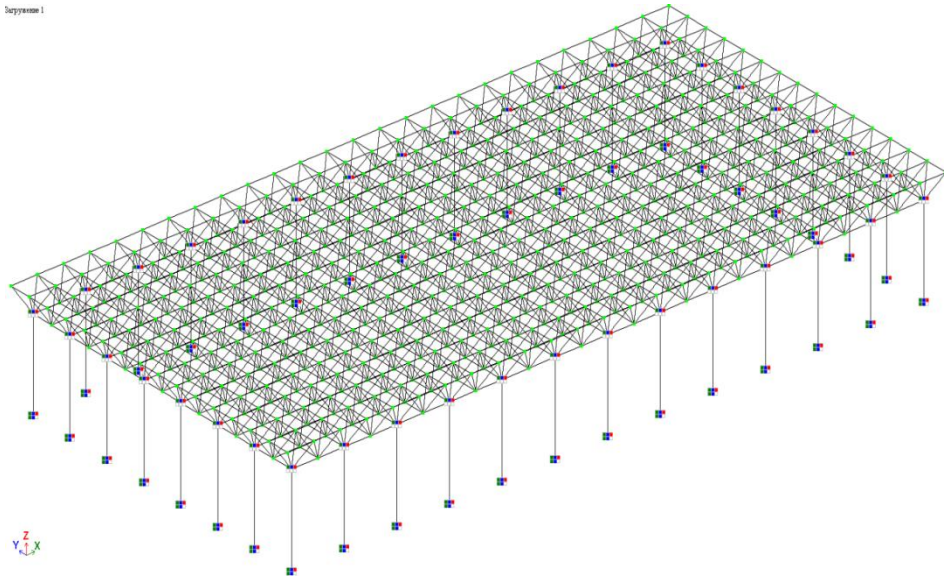


Рисунок 5.2 – Расчетная схема исследуемого покрытия

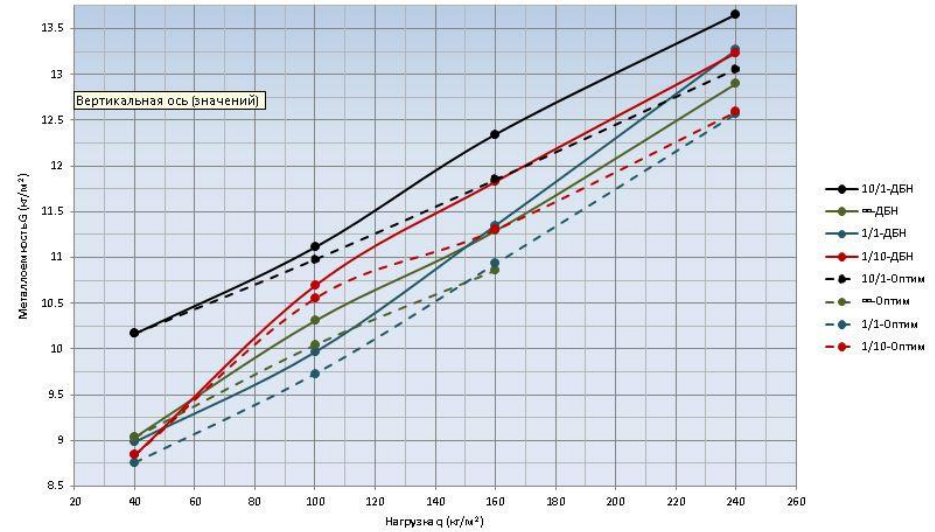


Рисунок 5.11 – Зависимость  $G-q$

Рисунок 5.3 – Зависимость  $G-q$

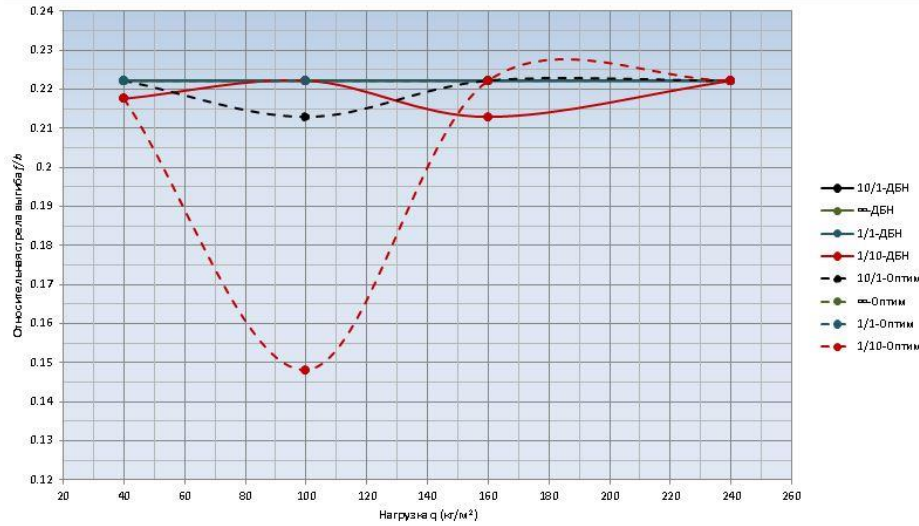


Рисунок 5.12 – Зависимость  $f/b-q$

Рисунок 5.4 – Зависимость  $f/b-q$

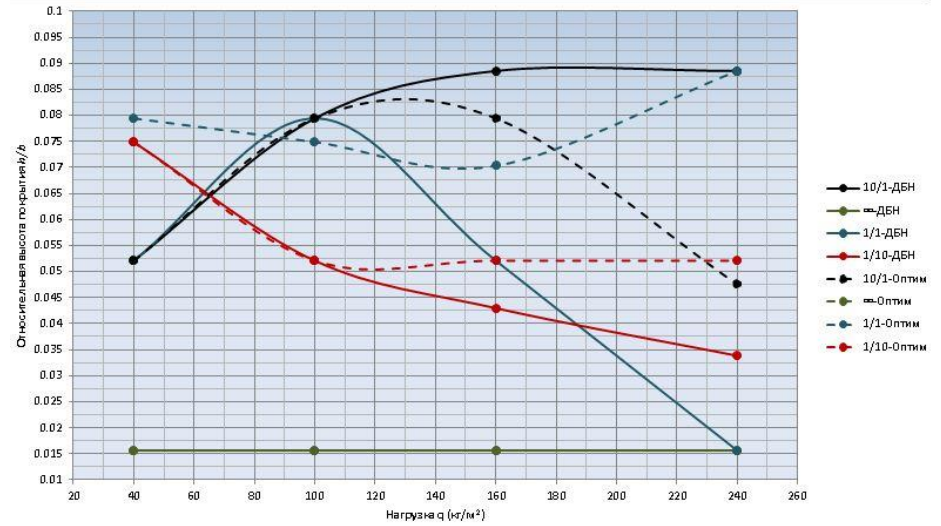


Рисунок 5.13 – Зависимость  $h/b-q$

Рисунок 5.5 – Зависимость  $h/b-q$

Таблица 5.7 – Результаты оптимизации покрытия на податливых опорах

| Исходные данные |                        |     |                |      |      |                   |                       |                     |                                      |                                    |                      |                    |                    |                  |                        |                      |                    |                  |
|-----------------|------------------------|-----|----------------|------|------|-------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------------|----------------------|--------------------|------------------|
| № п/п           | q (кг/м <sup>2</sup> ) | b/a | k <sub>1</sub> | b, м | a, м | A, м <sup>2</sup> | m <sub>ДБН</sub> , кг | m <sub>м</sub> , кг | G <sub>ДБН</sub> , кг/м <sup>2</sup> | G <sub>м</sub> , кг/м <sup>2</sup> | h <sub>ДБН</sub> , м | h <sub>м</sub> , м | h/b <sub>ДБН</sub> | h/b <sub>м</sub> | Z <sub>ДБН</sub> , (м) | Z <sub>м</sub> , (м) | f/b <sub>ДБН</sub> | f/b <sub>м</sub> |
| 1               | 2                      | 3   | 4              | 5    | 6    | 7                 | 8                     | 9                   | 10                                   | 11                                 | 12                   | 13                 | 14                 | 15               | 16                     | 17                   | 18                 | 19               |
| 1               | 40                     | 0.5 | 10/1           | 45   | 90   | 4050              | 41175.0               | 41189.1             | 10.167                               | 10.170                             | 2.3440               | 2.3440             | 0.052              | 0.052            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |
| 2               |                        |     | ∞              |      |      |                   | 36591.5               | 36591.5             | 9.035                                | 9.035                              | 0.7031               | 0.7031             | 0.016              | 0.016            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |
| 3               |                        |     | 1/1            |      |      |                   | 36387.0               | 35478.0             | 8.984                                | 8.760                              | 2.3440               | 3.5740             | 0.052              | 0.079            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |
| 4               |                        |     | 1/10           |      |      |                   | 35801.5               | 35801.5             | 8.840                                | 8.840                              | 3.3690               | 3.3690             | 0.075              | 0.075            | 9.791                  | 9.791                | 0.218              | 0.218            |
| 5               | 100                    |     | 10/1           |      |      |                   | 45001.1               | 44460.7             | 11.111                               | 10.978                             | 3.5740               | 3.5740             | 0.079              | 0.079            | 10.00                  | 9.582                | 0.222              | 0.213            |
| 6               |                        |     | ∞              |      |      |                   | 41748.6               | 40680.9             | 10.308                               | 10.045                             | 0.7031               | 0.7031             | 0.016              | 0.016            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |
| 7               |                        |     | 1/1            |      |      |                   | 40364.7               | 39401.6             | 9.967                                | 9.729                              | 3.5740               | 3.3690             | 0.079              | 0.075            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |
| 8               |                        |     | 1/10           |      |      |                   | 43301.6               | 42738.1             | 10.692                               | 10.553                             | 2.3440               | 2.3440             | 0.052              | 0.052            | 10.00                  | 6.666                | 0.222              | 0.148            |
| 9               | 160                    |     | 10/1           |      |      |                   | 49997.6               | 47992.3             | 12.345                               | 11.850                             | 3.9840               | 3.5740             | 0.089              | 0.079            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |
| 10              |                        |     | ∞              |      |      |                   | 45731.2               | 43972.2             | 11.292                               | 10.857                             | 0.7031               | 0.7031             | 0.016              | 0.016            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |
| 11              |                        |     | 1/1            |      |      |                   | 45965.3               | 44270.9             | 11.349                               | 10.931                             | 2.3440               | 3.1640             | 0.052              | 0.070            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |
| 12              |                        |     | 1/10           |      |      |                   | 47902.2               | 45771.0             | 11.828                               | 11.301                             | 1.9340               | 2.3440             | 0.043              | 0.052            | 9.582                  | 10.00                | 0.213              | 0.222            |
| 13              | 240                    |     | 10/1           |      |      |                   | 55306.00              | 52885.80            | 13.656                               | 13.058                             | 3.9840               | 2.1390             | 0.089              | 0.048            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |
| 14              |                        |     | ∞              |      |      |                   | 52235.10              | 48926.90            | 12.898                               | 12.081                             | 0.7031               | 0.7031             | 0.016              | 0.016            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |
| 15              |                        |     | 1/1            |      |      |                   | 53725.60              | 50902.50            | 13.266                               | 12.569                             | 0.7031               | 3.9840             | 0.016              | 0.089            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |
| 16              |                        |     | 1/10           |      |      |                   | 53601.80              | 50983.60            | 13.235                               | 12.589                             | 1.5230               | 2.3440             | 0.034              | 0.052            | 10.00                  | 10.00                | 0.222              | 0.222            |

#### 5.4.4. Результаты регрессионного анализа.

Аналогично ранее проведенным исследованиям, выполним статистическую обработку результатов полученных исследований, с помощью EXCEL. Ниже, в таблице 5.8 приведены расчетные регрессионные зависимости, позволяющие назначить с учетом податливости опорных конструкций основные геометрические параметры проектируемой конструкции, обеспечивающие оптимальный расход стали.

Таблица 5.8 – Результирующие формулы регрессионных зависимостей на податливых опорах\*

| № п/п | Формула  | Описание   | Коэфф. коррел. |
|-------|--|--|----------------|
| 1     | 2  | 3  | 4              |
| 1     | $G_{расч}=8,63805-0,00034*k_1+0,01923*q_{расч}$      | Определение удельной массы покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и относительная стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам                   | 0.958859       |
| 6     | $G_{расч}=8,74417-0,00037*k_1+0,01587*q_{расч}$      | Определение удельной массы покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и относительная стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором           | 0.933453       |
| 7     | $h/b_{расч}=0,064894-0,000046*k_1-0,000021*q_{расч}$ | Определение оптимальной относительной высоты покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и относительная стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам | 0,784184       |
| 8     | $h/b_{расч}=0,072853-0,000048*k_1-0,000066*q_{расч}$ | Определение оптимальной относительной высоты покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором       | 0.907314       |

\* *Примечание: 1. Оптимальная металлоемкость  $G$  и оптимальное значение относительной высоты покрытия  $h/b$  при учёте податливости опорных конструкций ( $k=\infty \dots 0,1$ ) достигается при условии максимального выгиба первоначально плоской структурной конструкции со стрелой подъема в центре покрытия  $f/b=0,222=1/4.5$ . 2. Максимальное значение  $f/b$  принято из*

*условия сформированного сочетания расчетных нагрузок, используемых при проведении численного эксперимента для получения оптимальных параметров (постоянная+ равномерно распределенная снеговая нагрузка по покрытию).*

#### 5.4.5. Выводы по результатам V-го раздела.

Анализируя, приведенные зависимости, можно сделать следующие выводы:

1. Сравнительный анализ возможных подходов к оптимизации (1-й и 2-й вариант оптимизации конструкции) показал значительное сокращение металлоемкости покрытия (до 30%), что обусловлено как изменением общей высоты покрытия, так и переходу геометрии покрытия от плоской к криволинейной форме. При этом, наибольший эффект оптимизации достигается за счет перехода от плоской к искривленной форме покрытия (в пределах 10..30%). Сохранение плоской формы покрытия и оптимизация лишь за счет изменения его относительной высоты позволяет снизить металлоемкость в пределах 1...9%.

2. Разработанная ранее методика к уточнению несущей способности центрально-сжатых стержней структурного покрытия, учитывающая влияние конструктивного решения узловых соединений на их несущую способность из условия устойчивости, позволяет дополнительно снизить металлоемкость покрытия в пределах 5%.

3. Построенная регрессионная модель и окончательные формулы к определению металлоемкости покрытия позволяет на стадии вариантного проектирования с учетом технических возможностей заказчика определить удельную массу и назначить оптимальные геометрические параметры проектируемого покрытия на нетиповом прямоугольном плане, формируемого из типового сортамента элементов. При этом экономия возрастает ещё в пределах 4%.

4. Учет податливости опор по сравнению с результатами расчета на неподвижном опорном контуре приводит к следующим результатам:

– Для удельной металлоемкости покрытия  $G$ :

- незначительному увеличению показателя (до 6% в рассматриваемом диапазоне нагрузок);
  - увеличение расчетной нагрузки в 6 раз (с 40 до 240 кг/м<sup>2</sup>) сопровождается увеличению металлоемкости до 35%.
- Для относительного выгиба  $f/b$ :
- Достижение оптимальной металлоемкости наблюдается при переходе от плоской конструктивной формы к криволинейной в виде двухпоясной стержневой оболочки положительной гауссовой кривизны с максимальной анализируемой стрелой подъема в центре  $f/b=1/4,5\approx 0,222$ .
- Для относительной высоты покрытия  $h/b$ :
- Учет податливости опорных конструкций вызывает необходимость увеличения относительной высоты покрытия с минимальной высотой  $h/b=0,015\approx 1/64$ , характерной для неподвижного контура, до  $h/b=0,088\approx 1/11$  – для податливого. При этом, несмотря на увеличение высоты покрытия наблюдается либо совершенно незначительное увеличение, либо при малых нагрузках даже некоторое снижение (до 1,1%) массы покрытия за счет снижения усилий в поясах.

5. Предложенные регрессионные зависимости для определения удельного расхода стали  $G$  и оптимальных геометрических параметров конструктивной формы в виде стержневой оболочки на нетиповом прямоугольном плане  $h/b$  определяемых с учетом действующей нагрузки и соотношения изгибных жёсткостей опорных конструкций и пролетной части, описывают установленные закономерности с адекватной достоверностью ( $\mu=0,83\dots 0,95$ ).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Достигнута основная цель исследований - разработаны подходы к проектированию оптимальных конструктивных форм структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах с учетом значимых параметров проектирования и уточненной несущей способности центрально-сжатых стержней, обеспечивающих возможность использования типовых конструктивных элементов.

2. Установлено, что в рамках разработанных ранее подходов к оптимальному проектированию структурных покрытий не учтены существенные факторы в виде:

- влияния конструктивного решения узловых соединений на несущую способность центрально-сжатых стержней из условия устойчивости;
- расширения конструктивных приемов по формообразованию структурных покрытий за счет перехода от плоской формы к двухпоясной сетчатой оболочке положительной кривизны;
- учета податливости опорных конструкций на оптимальные параметры проектируемого покрытия.

3. Уточненная несущая способность центрально-сжатых стержней структурных покрытий, соединенных в узлах типовыми шаровыми вставками-коннекторами, из условия устойчивости с достаточной для практических расчетов точностью может быть описана зависимостью  $\sigma_{кр}^p = 0,0004\lambda^2 - 0,1536\lambda + 28.681$  полученной на основе аппроксимации множественной линейной регрессии. С целью возможности выполнения расчетов центрально-сжатых стержней из условия устойчивости в традиционной для отечественных норм проектирования форме на основе установленных значений  $\sigma_{кр}^p$  получены значения коэффициентов  $\mu$  и  $\varphi$ , учитывающих гибкость и степень защемления стержня в соединениях структурных конструкций с шаровыми вставками-коннекторами.

4. Предложен алгоритм оптимального проектирования структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах, отличающийся от ранее разработанных возможностью:

- уточненной оценки несущей способности центрально-сжатых стержней из условия устойчивости;
- учета возможностей при изготовлении и монтаже разработки оптимального проектного решения в традиционной плоской форме, либо в виде двухпоясной стержневой оболочки положительной гауссовой кривизны;
- учета податливости опор при назначении оптимальных геометрических параметров проектируемой конструкции.

5. Выполнена оценка влияния податливости опор на оптимальные параметры проектируемой конструкции. На примере анализа изменения параметров проектирования для оболочки на прямоугольном плане установлено, что:

- при использовании 2-х управляющих параметров ( $h/b$  и  $f/b$ ) увеличение податливости опорных конструкций вызывает необходимость увеличения стрелы подъема  $f/b=1/4,5\approx 0,222$  при необходимости увеличения высоты покрытия до  $h/b=1/16\dots 1/20$ , обусловленного необходимостью повышения жесткости пролетной части покрытия;
- среднее увеличение металлоемкости системы за счет увеличения податливости опор достигает 8...12%. В отдельных случаях при высокой податливости опор и малых расчетных нагрузках отмечается незначительное снижение металлоемкости покрытия (до 3%).

6. Результаты исследования внедрены ООО «Донецкий ПромстройНИИпроект» при оценке напряженно-деформированного состояния элементов структурных конструкций покрытия СК «ДОНБАСС АРЕНА» в рамках договора №8136 от 27.04.2020 г. «Капитальный ремонт строительных конструкций СК «ДОНБАСС АРЕНА» по адресу ДНР, г. Донецк, ул. Челюскинцев, 189 Е. Рабочий проект». Разработаны «Рекомендации по



проектированию структурных покрытий с шаровыми узловыми вставками-коннекторами на высокопрочных болтах».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агеев А.И. Некоторые целочисленные многоэкстремальные задачи проектирования стальных конструкций // Строит. механика и расчет сооружений. – 1974. - №3. – с.14-17.
2. Алпатов В.Ю., Хохлов И.С. Оптимизация геометрической формы пространственно-стержневых конструкций [Текст] / УАМК МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ, ТОМ 15, N1 (2009), с. 47-57.
3. Андронников А.В. Элементы структурной оптимизации пространственных металлических стержневых конструкций [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 – Уральский государственный технический университет, Екатеринбург, 2003 – 171 с.
4. Аникеев И.Д., Голиков А.В. Вывод и анализ методик расчета центрально-сжатых стальных стержней, заложенных в различные нормативные документы [Текст] / Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования, Том. 19, №3 (2018), с. 299-316.
5. Аннин Б.Д., Власов А.Ю., Захаров Ю.В., Охоткин К.Г. Исследование статической и динамической устойчивости гибких стержней в геометрически нелинейной постановке [Текст] / Механика твердого тела, № 4 (2017), с. 6-18.
6. Артемов А.А. Устойчивость стержневых элементов, работающих в составе решетчатых конструкций [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – ЗАО ЦНИИПСК им. Мельникова, Москва, 2004 – 174 с.
7. Блюмин С.Л., Зверев В.В., Сотникова И.В., Сысоев А.С.. Решение задачи устойчивости сжато-изгибаемых жестко опертых стержней переменной жесткости [Текст] / Вестник МГСУ (2015), выпуск 5, Москва, с. 18-26.
8. Бондарев А.Б., Югов А.М. Методика расчет точности большепролетных шарнирно-стержневых металлических покрытий [Текст] // Инженерно-строительный журнал.2016. №1(61). С. 60-73.

9. Бубнов И.Г. Отзыв на работу Тимошенко «Об устойчивости упругих систем», Сборник института инженеров путей сообщения, 1913.
10. Вадзинский Р. Статистические вычисления в среде Excel. Библиотека пользователя. – СПб.: Питер, 2008. – 608 с.: ил. – (Серия «Библиотека пользователя»).
11. Василькин А.А., Денякова В.В. Регулирование напряженно-деформируемого состояния структурной плиты покрытия [Текст] / Инженерный вестник Дона, №2 (2018). – Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета.
12. Вареник Е.И. Основы технико-экономического анализа элементов строительных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1952. – 105 с.
13. Виноградов А.И. Вопросы расчета сооружений наименьшего веса [Текст] / тр.ХИИТ-М.: Трансжелдориздат, 1955. – вып. 25. – 176 с.
14. Власов В.З. Избранные труды. Том 1. Очерк научной деятельности «Общая теория оболочек». Статьи [Текст]. – М.: Издательство Академии Наук СССР, 1962. – 528 с.
15. Власов В.З. Избранные труды. Том 2. Тонкостенные упругие стержни. Принципы построения общей технической теории оболочек [Текст]. – М.: Издательство академии наук, 1963. – 507 с.
16. Власов В.З. Избранные труды. Том 3. Тонкостенные пространственные системы [Текст]. – М.: Издательство «Наука», 1964. – 428 с.
17. Галеркин Б.Г. Стержни и пластинки. «Вестник инженеров», 1915.
18. Галеркин Б.Г. Теория продольного изгиба. «Известия Петербургского политехнического института», 1909.
19. Гарифуллин М.Р., Семенов С.А., Беляева С.В., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н., Семенов А.А. Поиск рациональной геометрической схемы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения [Текст] // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 2(17). С. 107-124. DOI: 10.18720/CUBS.17.9

20. Гарнаев А.Ю. Excel, VBA, Internet в экономике и финансах. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 816 с.: ил.
21. Гастев В.А., Лубо Л.Н. Расчет плит регулярной стержневой структуры [Текст] / Теоретическая механика, сопротивление материалов, строительная механика. Доклады XXV научной конференции. ЛИСИ, 1967.
22. Гинзбург А.В., Василькин А.А. Постановка задачи оптимального проектирования стальных конструкций [Текст] / Вестник МГСУ (2014), выпуск 6, Москва, с. 52-62.
23. Городецкий Д.А., Барабаш М.С., Водопьянов Р.Ю., Титок В.П., Артамонова А.Е.. Программный комплекс Лира-САПР 2013: Учебное пособие Под ред. академика РААСН АС Городецкого [Электронный ресурс] / М: Электронное издание, 2013г.– 376 с. [Режим доступа: [http://www.liraland.ru/public\\_private/lira/2013/books\\_lirasapr\\_2013.pdf](http://www.liraland.ru/public_private/lira/2013/books_lirasapr_2013.pdf)]
24. Горохов Евгений Васильевич. Расчет и проектирование пространственных металлических конструкций : учебное пособие / Евгений Васильевич Горохов, Владимир Филиппович Мущанов, Ярослав Викторович Назим, Игорь Викторович Роменский; И.о. М-во образования и науки, молодежи и спорта Украины, Донбас. нац. акад. стр-ва и архитектуры; Под общ.ред. Евгений Васильевич Горохов.– Макеевка : ДонНАСА, 2012.– 560 с. 350 экз.– Библиогр.: с. 513-525 . – На рус.яз. ISBN 6-17-599012-4 : 35.00.
25. Горохов Е.В., Васылев В.Н., Мущанов А.В., Волчков А.Н.. [Экспериментальное исследование влияния узловых соединений структурных конструкций на устойчивость центрально-сжатых стержней](#) [Текст] // МК Металлические конструкции 2020, ТОМ 26, НОМЕР 2, С.87-101. ISSN 1993-3517 online.
26. Горохов Е.В., Мущанов А.В. Анализ влияния конструктивных особенностей узловых соединений на несущую способность центрально сжатых стержней структурных покрытий // Металлические конструкции 2017, ТОМ 23, НОМЕР 3, С. 139-151. ISSN 1993-3517 online.

27. Горохов Е.В., Мущанов В.Ф., Роменский И.В., Мущанов А.В. Влияние геометрических параметров на напряженно-деформированное состояние структурного покрытия на прямоугольном плане [Текст] / УАМК Металлические конструкции 2015, ТОМ 21, НОМЕР 4, С. 191-206. ISSN 1993-3517 online.
28. Горохов Е.В., Роменский И.В., Мущанов А.В., Осипов Н.С. [Регулирование усилий в структурных конструкциях методом обратного выгиба](#) [Текст] / ВЕСТНИК Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Выпуск 2019-3 (137). – Макеевка: ДонНАСА. – 2019, - с. 46-50.
29. Горохов Е.В., Танасогло А.В., Мущанов А.В. Оценка устойчивости центрально-сжатых стержней структурных покрытий с учётом конструктивных особенностей узловых соединений и нелинейной работы материала // УАМК Металлические конструкции 2018, ТОМ 24, НОМЕР 3, С.105-121. ISSN 1993-3517 online.
30. ГОСТ 25026-80. Планирование эксперимента. Термины и определения. М: Госстандарт, 1980, 18 с.
31. ГОСТ 27772-2015. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия (с Поправками, с Изменением №1)
32. ГОСТ 4543-2016.Metalлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия.
33. ГОСТ Р 58064-2018. Трубы стальные сварные для строительных конструкций. Технические условия [Текст] / М: Стандартиформ, 2018, 37 с.
34. ГОСТ Р 52728-2007. Метод натурной тензотермометрии. Общие требования. М.: Стандартиформ, 2007, 16 с.
35. ДБН В.1.2-2:2006. Система обеспечения надежности и безопасности строительных объектов. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. К.:Мінбуд України, 2006. – 75 с.
36. ДБН В.2.6-198:2014. Стальные конструкции. Нормы проектирования. [Текст]. – Введ. 2015-01-01. К.:Мінбуд України, 2014. – 198 с.
37. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.: ил.

38. Изготовление большепролетных металлоконструкций «Новый поток» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pspk.pro/> (дата обращения: 14.12.2019)
39. Каримбаев К.Д., Пальчиков Д.С.. О критериях потери устойчивости сжатых стержней за пределами упругости при жестком нагружении [Текст] / Вестник УГАТУ, Т. 19, №3 (69), 2015 – с. 126-131.
40. Клименко В.И. Устойчивость сжатых стержней в зависимости от повышения физико-механических свойств упрочненных конструкционных материалов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 – ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», Волгоград, 2013 – 128 с.
41. Колесниченко С.В. Действительная работа стропильных ферм с поясами из широкополочных двутавров [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Днепропетровск, 1991.
42. Компьютерное моделирование в задачах строительной механики. А.С. Городецкий, М.С. Барабаш, В.Н. Сидоров. Москва: Издательство АСВ – 2016, 338 с.
43. Компьютерные модели конструкций. А.С. Городецкий, И.Д. Езеров. – К.: издательство «Факт», 2005. – 344 с.
44. Конспект лекций по курсу «Современные методы численного моделирования пространственных конструкций и сооружений с использованием методов теории упругости и пластичности». Часть 2 (для магистров специальности ПГС). В.Ф. Мущанов, Н.Р. Жук. [Текст] – ПЦ ДонНАСА, 2012. – 88 с.
45. Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Думбай В.А., Данилейко И.Ю. Регулирование напряженно-деформированного состояния структурного покрытия способом изменения геометрической схемы сооружения [Текст] / Инженерный вестник Дона, № 1 (2017). – Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета.
46. Кучеренко И.В. Оптимизация стержневых конструкций с учетом особенностей работы узлов и соединений [Текст]: дис. ... канд. техн. наук:

05.23.17 – Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, 2003 – 119 с.

47. Лащенко М.Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений [Текст] / Ленинград: Стройиздат, 1969 – с.184.

48. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений. Трофимов В.И., Каминский А.М. – Москва: Издательство АСВ, 2002. – 573 с.

49. Лейтес С.Д. Устойчивость сжатых стальных стержней.[Текст].– М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1954. – 305 с.

50. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. Физматгиз, 1959.

51. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. [Текст]. – М.: Стройиздат, 1979. – 319 с.

52. Лубо Л.Н. Матричный метод некоторых типов пространственных регулярных стержневых систем. В сб. ЛенЗНИИЭП. «Пространственные конструкции», 1966.

53. Лубо Л.Н. Расчет некоторых типов пространственных регулярных стержневых систем [Текст] / «Теоретическая механика, сопротивление материалов, строительная механика». Доклады к XXIV научной конференции. ЛИСИ, 1966.

54. Лубо Л.Н. Теория статического расчета пространственных регулярных стержневых систем. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н., Ленинградской ИСИ, Ленинград, 1967.

55. Металлические конструкции. В 3т. Т.1. Элементы конструкций: Учеб. для строит. вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов и др.; Под ред. В.В. Горева – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2004. – 551 с.: ил.

56. Металлические конструкции. Общий курс: Учебник для вузов / Е.И. Беленя, В.А. Балдин, Г.С. Ведеников и др.; Под общ. ред. Е.И. Беленя. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1986, - 560 с., ил.

57. Металлические конструкции: Спец. курс: Учеб. пособие для вузов / Е.И. Беленя, Н.Н. Стрелецкий, Г.С. Ведеников и др.; Под ред. Е.И. Беленя – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 687 с.

58. Мущанов А.В., Мущанов В.Ф., Роменский И.В. Влияние податливости опор на напряженно-деформированное состояние элементов структурного покрытия [Текст] // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №1(40). С. 7-19

59. Мущанов А.В., Мущанов В.Ф., Роменский И.В. Рациональные геометрические и жесткостные параметры большепролетного структурного покрытия [Текст] // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №2 (41). С. 18-29.

60. Мущанов А.В. Оптимальные конструктивные решения структурных покрытий на прямоугольных нетиповых планах [Текст] // МК Металлические конструкции 2020, ТОМ 26, НОМЕР 1, С.37-48. ISSN 1993-3517 online.

61. Мущанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Мущанов А.В. Оптимальное проектирование структурных покрытий на нетиповых планах [Текст] / Международная научно-практическая конференция, посвященная 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ (XXIII научные чтения), 2019.

62. Мущанов В.Ф., Югов А.М., Бондарев А.Б. Исследование геометрических отклонений при возведении большепролетного покрытия над трибунами стадиона с большим вырезом на эллиптическом плане «Донбасс Арена» [Текст] / Вестник МГСУ (2017), ТОМ 12, выпуск 7 (106), Москва, с. 761-773.

63. Нилов А.А., Пермяков В.А., Шимановский А.В., Билык С.И., Лавриненко Л.И., Белов И.Д., Володимирский В.О. Металлические конструкции: Общий курс: Учебник для высших учебных заведений. – Издание 2-е переработанное и дополненное / Под общей редакцией А.А. Нилова и А.В. Шимановского. – К.: Издательство «Сталь», 2010. – 869 с., рис. 408, табл. 138.



64. ОВЕН МВ110-224.1ТД. Модули ввода сигналов тензодатчиков. Руководство по эксплуатации. АРАВ.4111134.001 РЭ / Харьков, 2012.
65. ООО НПЦ Виктория: система МАРХИ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sistems-marhi.ru/> (дата обращения: 22.03.2017)
66. Перельмутер А.В, Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа– 4-е изд., перераб. М.: Изд-воСКАДСОФТ, 2011. 736 стр.
67. Перельмутер А.В. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы: [в 3 т.] / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – Москва : Изд-во СКАД СОФТ, 2010-2-11. – 24 см.; ISBN 978-5-903683-08-6.
68. Проектирование металлических конструкций: Спец. курс. Учеб. пособие для вузов / В.В. Бирюлев, И.И. Кошин, И.И. Крылов, А.В. Сильвестров. – Л.: Стройиздат, 1990 – 432 с.: ил.
69. Рабинович И.М. К теории статически неопределимых ферм [Текст] / М.: Трансжелдориздат, 1933. – 120 с
70. Расчет стальных конструкций: Справ. пособие / Я.М. Лихтарников, Д.В. Ладыженский, В.М. Клыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Будівельник, 1984. – с. 368.
71. Реклейтис Г., Рейвидран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. – М.: Мир, 1986. – 2т.
72. Рекомендации по проектированию структурных конструкций / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР [Текст]. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.
73. Ржаницын А.Р. Графический метод решения некоторых задач на продольный изгиб / Строительная промышленность, 1938.
74. Роменский И.В., Загоруйко Т.И., Мущанов А.В. Основные подходы к назначению пространственных и жесткостных характеристик покрытия системы МАРХИ при регулировании параметров его напряженно-деформированного состояния [Текст] / УАМК Металлические конструкции 2015, ТОМ 21, НОМЕР 1, С. 5-14. ISSN 1993-3517 online.
75. Роменский И.В., Мущанов А.В. Способы регулирования усилий в элементах структурного покрытия из труб типа МАРХИ [Текст] / ВЕСТНИК

Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Выпуск 2014-4 (108). – Макеевка: ДонНАСА. – 2014, - с. 74-77.

76. Роменский И.В. Оптимизация конструкций мембранных покрытий положительной гауссовой кривизны на прямоугольном и круглом плане [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 – ЦНИИПСК им. Кучеренко, Москва, 1990.

77. Себешев В.Г. Расчет стержневых систем на устойчивость методом перемещений: Учеб. пособие / В.Г. Себешев; Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т. (Сибстрин). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2004. – 84 с

78. Серия 1.460-6. Структурные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий пролетом 18 и 24 м из прокатных профилей типа «ЦНИИСК».

79. Серия 1.466-2. Пространственные решетчатые конструкции из труб типа «Кисловодск».

80. Серпик И.Н., Алексейцев А.В., Балабин П.Ю., Курченко Н.С. Плоские стержневые системы: оптимизация с контролем общей устойчивости // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 8(76). С. 181–192.

81. Скалаухов А.П. Исследование массы, трудоемкости и стоимости конструкций висячих покрытий и определение границ их рационального применения (однослойные, из отдельных вант, и двухпоясные покрытия) [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Киев, 1980.

82. Солдатов А.Ю. Разработка алгоритмов исследования устойчивости пространственных конструкций с учётом физической нелинейности [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17. – ФГБОУ ВПО «МГСУ», Москва, 2014 – 121 с.

83. СП 16.13330.2017 «СНИП II-23-81\* Стальные конструкции» [Текст]. – Введ. 2017-08-28. М.: Минстрой России, 2017. – 140 с.

84. Стрелецкий Н.С. Работа сжатых стоек. Материалы к курсу стальных конструкций. Выпуск II. Часть I. [Текст]. – М.:Госстройиздат, 1959. – 275 с.

85. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В.. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений [Текст] / Вестник МГСУ, Том 15, Выпуск 1, 2020. с. 12-30.

86. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
87. Теория вероятностей и математическая статистика (4-е издание): учебник / Лебедев А.В., Фадеева Л.Н.: Москва, 2018 – 480 с.
88. Тимошенко С.П.. Сопротивление материалов. Том первый. Элементарная теория и задачи. [Текст]. – М.: Издательство «Наука», 1965. – 363 с.
89. Трофимов В.И., Бегун Г.Б. Структурные конструкции (Исследование, расчет и проектирование) [Текст]. – М.: Стройиздат., 1972.
90. Трофимович В.В. Оптимизация металлических конструкций. – Киев: Вища шк., 1983. – 200 с.
91. Трущев А. Г. Пространственные металлические конструкции: учебное пособие. [Текст]. – М.: Стройиздат, 1983. – 216 с.
92. Файбишенко В.К. Металлические конструкции: учеб. Пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 1984. – 336 с., ил.
93. Файбишенко В.К. Экспериментальные исследования квадратных в плане перекрестных систем при различных вариантах опирания [Текст] / В сб. «Строительная механика. Расчет и конструирование сооружений». Труды Московского ордена Трудового Красного Знамени архитектурного института, 1969.
94. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. 534 с.
95. Хисамов Р.И. Расчет и конструирование структурных покрытий [Текст]. Киев: Будивельник, 1981. – 48 с.
96. Шевченко Е.В. Исследование оптимальных параметров конструкций опор ЛЭП на оттяжках [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Киев, 1981.
97. Шимановский В.Н., Гордеев В.Н., Гринберг М.Л. Оптимальное проектирование пространственных решетчатых покрытий. [Текст]. – К.: Будівельник, 1987. – 224 с.
98. Шкляр В.Н.. Планирование эксперимента и обработка результатов. Конспект лекций для магистров по направлению 220200 «автоматизация и

управление в технических (мехатронных) системах [Текст] / Томск: Издательство Томского политехнического университета – 2010, 90 с.

99. Яньков Е.В.. Оптимизация стержневых систем с варьированием граничных условий [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 – Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, 2000 – 200 с.

100. Ф.С. Ясинский. О сопротивлении продольному изгибу, 1894.

101. Antonioua N., Nikolaidisb Th., Baniotopoulousa C.C.. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts // *Engineering Structures* Volume 59, February 2014, Pages 21–27

102. Argiris D. Three dimensional Anisotropic and Inhomogeneous Elastic Media, *Ingenieur-Archiv*, Nr. 1, 1965.

103. Bin Li, Hua Luo, Xianqiao Wang. Failure analysis of locally damaged slender steel bars strengthened with CFRP composites: experiments, theory and computational simulations [Текст] / *Hindawi Advances in Civil Engineering* Volume 2020, Article ID 8831701, 14 pages.

104. Bujisen Michel. Dynamic Space Frame Structures [Web source]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/saddbtreports/1011nj/Dynamic\\_Space\\_Frame\\_Structures\\_Michel\\_Bujisen.pdf](http://homepage.tudelft.nl/x4x4j/saddbtreports/1011nj/Dynamic_Space_Frame_Structures_Michel_Bujisen.pdf) (date of reference 14.05.2015).

105. Caia Jianguo, Jian Fenga, Chao Jiang. Development and analysis of a long-span retractable roof structure // *Journal of Constructional Steel Research* Volume 92, January 2014, Pages 175–182

106. Causevic A., Salihbegovic A., Rustempasic N. Integrating new structures with historical constructions – a transparent roof structures above the centrally designed atrium [Текст] / *WMCAUS 2018 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 471 (2019) 112102.

107. Chao Li, Jia Xu, Guosong Feng, Zhiwen Zhu. Design and Static Analysis of Cellular Double-Layer Grid Roof Structures with Hexagonal Cone System [Текст] / *2<sup>nd</sup> International Conference on Frontiers of Materials Synthesis and Processing IOP Conf. Series: Material Science and Engineering* **493** (2019) 012131.

108. Cheng Lan, Xi Tu, Junqing Xue, Briseghella, Zordan. Adaptive form-finding method for form-fixed spatial network structures [Текст] / International Journal of Advanced Structural Engineering (2018). P. 99-109.

109. Cong Liu, Lin He, Zhenyu Wu, Jian Yuan. Experimental study on joint stiffness with vision-based system and geometric imperfections of temporary member structure [Текст] / Journal of Civil Engineering and Management, 2018 Volume 24 Issue 1: 43-52.

110. Dzwierzynska J. Integrated parametric shaping of curvilinear steel bar structures of canopy roofs [Текст] / Building 2019, 9, 72.

111. Dzwierzynska J. Shaping of spatial steel rod structures based on a hyperbolic paraboloid [Текст] / Archives of civil engineering vol. LXIV, issue 4 (2018), 309-320.

112. Engesser F. Zeitschrift fur Arch. u Jng. Wesen, 1889.

113. Euler L. Methodus inveniendi lineas curvas. Additamentum 1. De curvis elasticis, 1744. Русский перевод: Л. Эйлер, Метод нахождения кривых линий. Приложение 1. «Об упругих кривых» / Гостехиздат, 1934.

114. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. [Text].EN 1993-1-1:2005/AC:2009.

115. Fang Youngfeng, Wang Li, Kong Fah Tee. Analysis of the Steel Structures Reliability under the Big Data [Текст] / 2020 World Symposium on Smart Materials and Applications (WSSMA 2020) IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 958 (2020) 012001.

116. Fitrah R.A., Nofriyandi R. The performance between two-long span roof trusses of cold formed with back to back channel section [Текст] / International conference on applied sciences, information and technology 2019 IOP Conf. Series: Material Science and Engineering **846** (2020) 012060.

117. Garanzha I.M., Vatin N. Analytical methods for determination a load capacity of concrete-filled tubes under axial compression [Текст] / Applied Mechanics and Materials (volumes 633-634) (2014), p. 965-971.

118. Gaylord E., Gaylord C., Stallmeyer J. Structural engineering. New York: The McGraw Hill Companies, 1997. 1024 p. – ISBN 0070237247.
119. Gordini M., Mohammad R. Habibi, Mohammad H. Tavana, Moslem Amiri, Mehrzad T. Roudsari. Influence of member length imperfection on the capacity of spatial structures [Текст] / The open civil engineering journal, V12(2018), P. 481-494.
120. Guan X., Huipin Chen, Jian He, Xiaodan Sun. Investigation of snow load effects on modal parameters of a steel structure roof [Текст] / Hindawi Shock and Vibration Volume 2018, Article ID 7018325, 24 pages.
121. Hassani V., Khabazi Z., Raspall F., Banon C., David W. Rosen. Form-finding and structural shape optimization of the metal 3D-Printed multi-branch node with complex geometry [Текст] / CAD Conference 19, Singapore – 2019, p. 24-28.
122. Hooke R., Geeves T. Direct search of numerical and statistical problems // g. ASM. – 1966. – №8. – p.212-229.
123. Huberman N., Pearlmuttera D., Galb E., Meira I.A.. Optimizing structural roof form for life-cycle energy efficiency // Energy and Buildings, Volume 104, 1 October 2015, Pages 336–349
124. Hutchinson R.G., [et al]. Kagome plate structures // International Journal of Solids and Structures, №40. 2003, pp. 6969-6980.
125. Imediegwu C., Murphy R., Hewson R., Santer M. Multiscale structural optimization towards three-dimensional printable structures [Текст] / Structural and Multidisciplinary Optimization (2019) 60: 513-525.
126. Kala Z. Stability of von-Misses truss with initial random imperfections [Текст] / Procedia Engineering 172 (2017), 473-480.
127. Khusnutdinov R., Konoplev Y., Kayumov R. Features of stability loss of structures on an elastic foundation [Текст] / STCCE-2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (2020) 012060
128. Kociecki M., Adeli H. Shape optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex geometries using evolutionary computing [Текст] / Engineering applications of artificial intelligence 38 (2015), 168-182.

129. Kociecki M., Adeli H. Two-phase genetic algorithm for size optimization of free-form steel space-frame roof structures [Текст] / Journal of Construction steel research 90 (2013), 283-296.

130. Kurniawan M., Adha A. Truss structure optimization for two design variable elements using Genetic Algorithm with stress and failure probability constraints [Текст] / 7<sup>th</sup> International Conference on Euro Asia Civil Engineering Forum IOP Conf. Series: Material Science and Engineering **615** (2019) 012091.

131. Le ricolais R. Calcul des tension et des deformations en fleuxion plane d`un reseau hexagonal a trois dimensions appuye sur le pourfour [Текст] / Genie civil, 15 mai, 1949.

132. Li-Min Tian, Jian-Peng Wei, Ji-Ping Hao. Method for evaluating the progressive collapse resistance of long-span single-layer spatial grid structures [Текст] / Advanced Steel Construction – Vol.15 No. 1 (2019) 109-115.

133. Mu Q.-S. Theoretic analysis on the buckling of a simply compressible elastic rod under the axial pressure [Текст] / Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics (2013), 30 (11), pp. 185-191.

134. Neeraja D, Thejesh Kamireddy, Potnuru Santosh Kumar, Vijay Simha Reddy. Weight optimization of plane truss using genetic algorithm [Текст] / 14<sup>th</sup> ICSET-2017 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **263** (2017) 032015.

135. Nelder J.A., Mead R. // Computer Journal. – 1964. – V.7. – P. 308.

136. Petrovic N., Kostic N., Marjanovic N., Zivkovic J., Ioana I Cofaru. Effects of structural optimization on practical roof truss construction [Текст] / Applied Engineering Letters Vol.5, № 2, 39-45 (2020).

137. Renton John D.. Chapter 15 - Regular Structures // Elastic Beams and Frames (Second Edition) - 2002. pp. 15.1 -15.36.

138. Rosen A., Sabag M., Givoli M. A general nonlinear structural model of a multirod (multibeam) system—I. Theoretical derivations // Computers & Structures, Volume 61, Issue 4 - 1996. pp. 617-632.

139. Schumacher M., Schaeffer O., Vogt M.M. Move – Architecture in Motion. Basel: Birkhauser Verlag AG. 2010, 248 p. ISBN: 3764399864.

140. Serpik I.N., Averin A.S.. Optimization of steel frames with the choice of materials grades with restrictions on general and local stability, strength and stiffness [Текст] / CATPID-2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **913** (2020) 022039.

141. Serpik I.N., Tarasova N.V.. Parametric optimization of pre-stressed steel arch-shaped trusses with ties [Текст] / ICCATS 2018 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **451** (2018) 012060.

142. Timoshenko & Gere. Theory of elastic stability [Текст] / NY, the McGraw Hill Book Company, Inc., 1985 – 541 p.

143. Vasilkin A. Mathematical and computer modeling in the design of steel rod structures [Текст] / Modeling and Methods of Structural Analysis IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1425 (2020) 012172.

144. Vasilkin A. Possibilities of applying structural optimization in building structures computer-aided design systems [Текст] / MATEC Web Conf. Volume 251, 2018. VI International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education” (IPICSE-2018).

145. Vasilkin A. The use of methods of structural optimization at the stage of designing high-rise buildings with steel construction [Текст] / E3S Web of Conferences **33**, 03078 (2018) HRC 2017.

146. Volkov A.A., Vasilkin A. Optimal design of the steel structure by the sequence of partial optimization [Текст] / Procedia Engineering 153 (2016), 850-855.

147. Zhang W., Kawaguchi K., Wu M. Optimization of frame structures with kinematical indeterminacy for Optimum Folding [Текст] / (2019) Journal of Engineering Mechanics, 145 (9).

148. Zheng Y., Zheng H. Steel rod stability and inelastic buckling study [Текст] / Applied Mechanics and Materials (2013), 357-360, pp, 626-630.

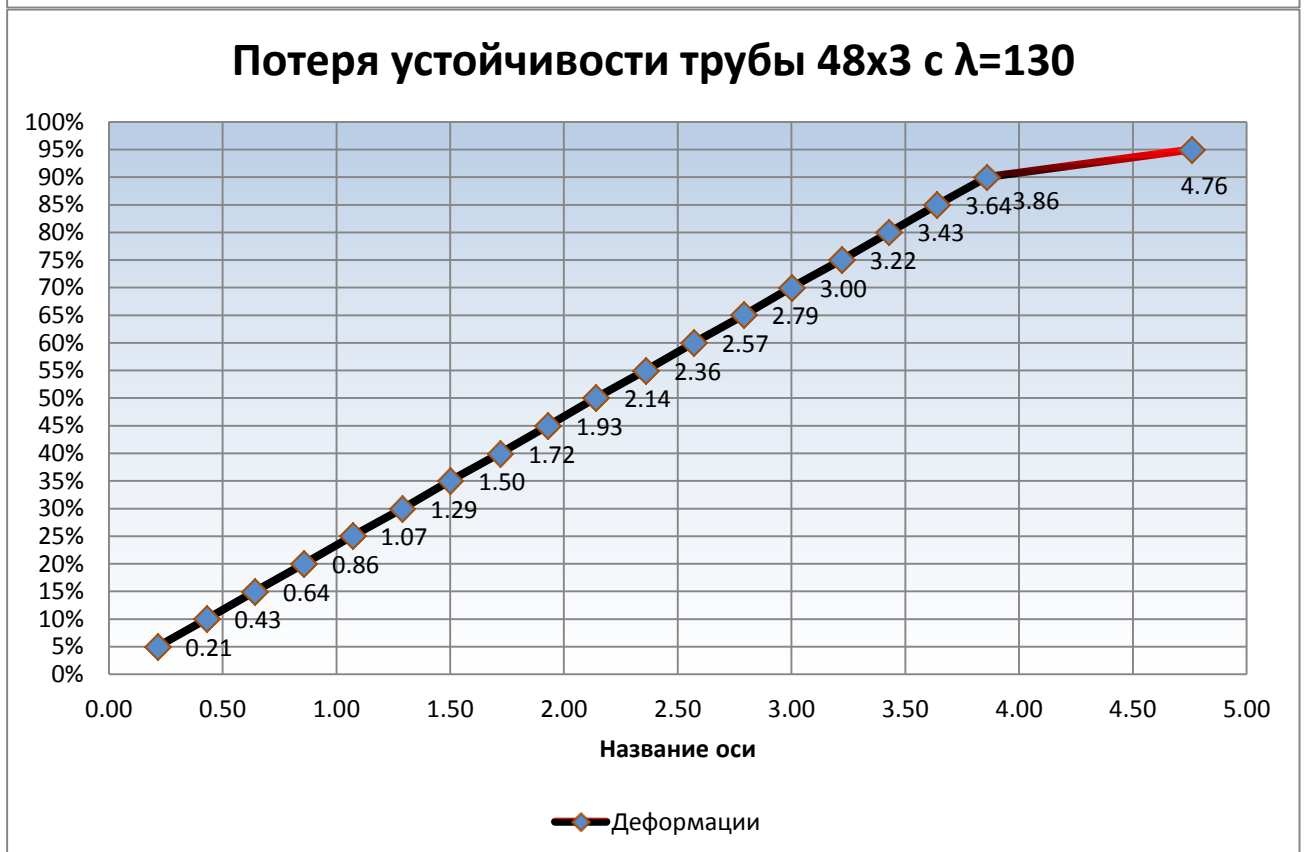
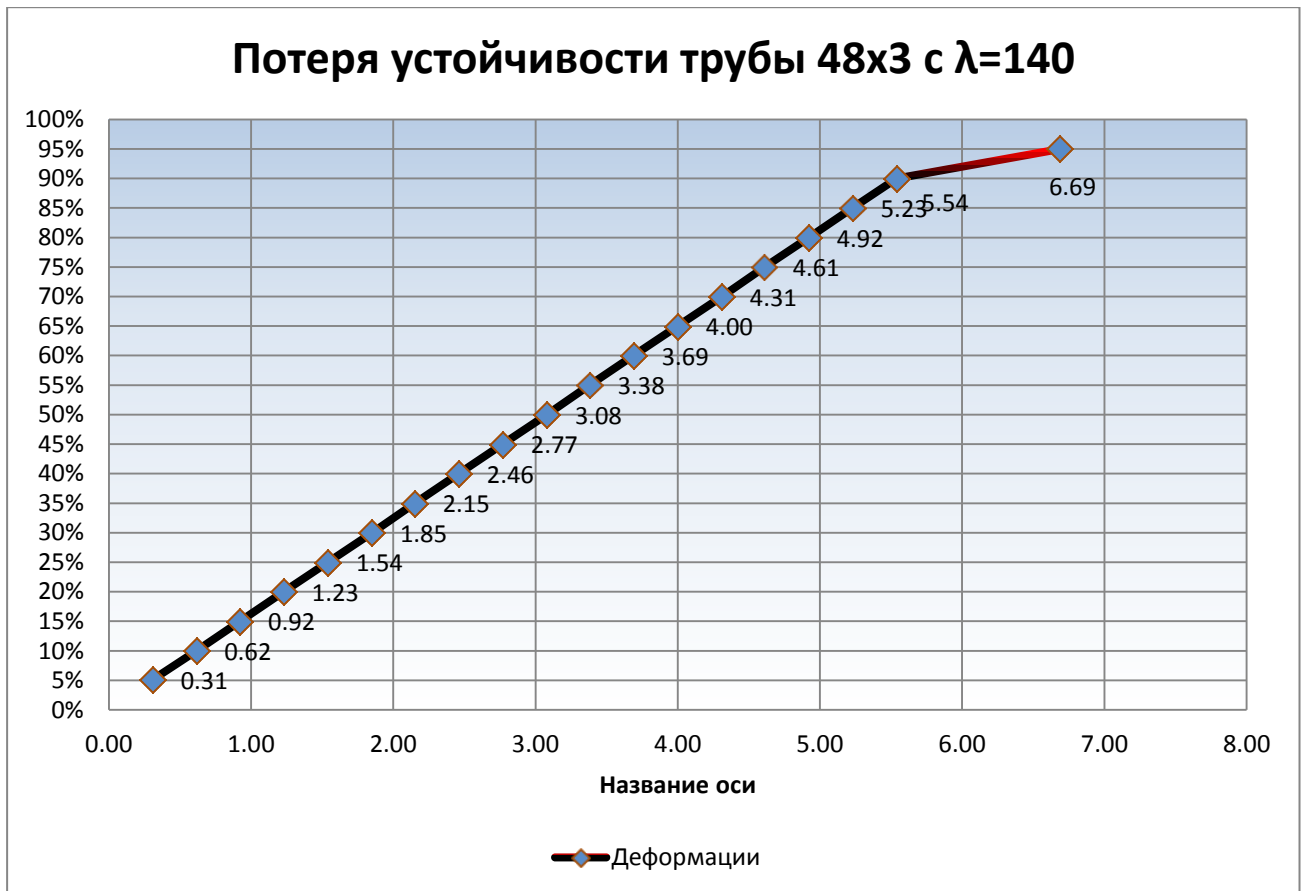
149. Zverev V.V, Liubavskaia I.V, Meshcheryakova E.V, Sotnikova M.V. The stability of a compressed resiliently supported rod of variable stiffness [Текст] / APCSCCE IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 456 (2018) 012032.



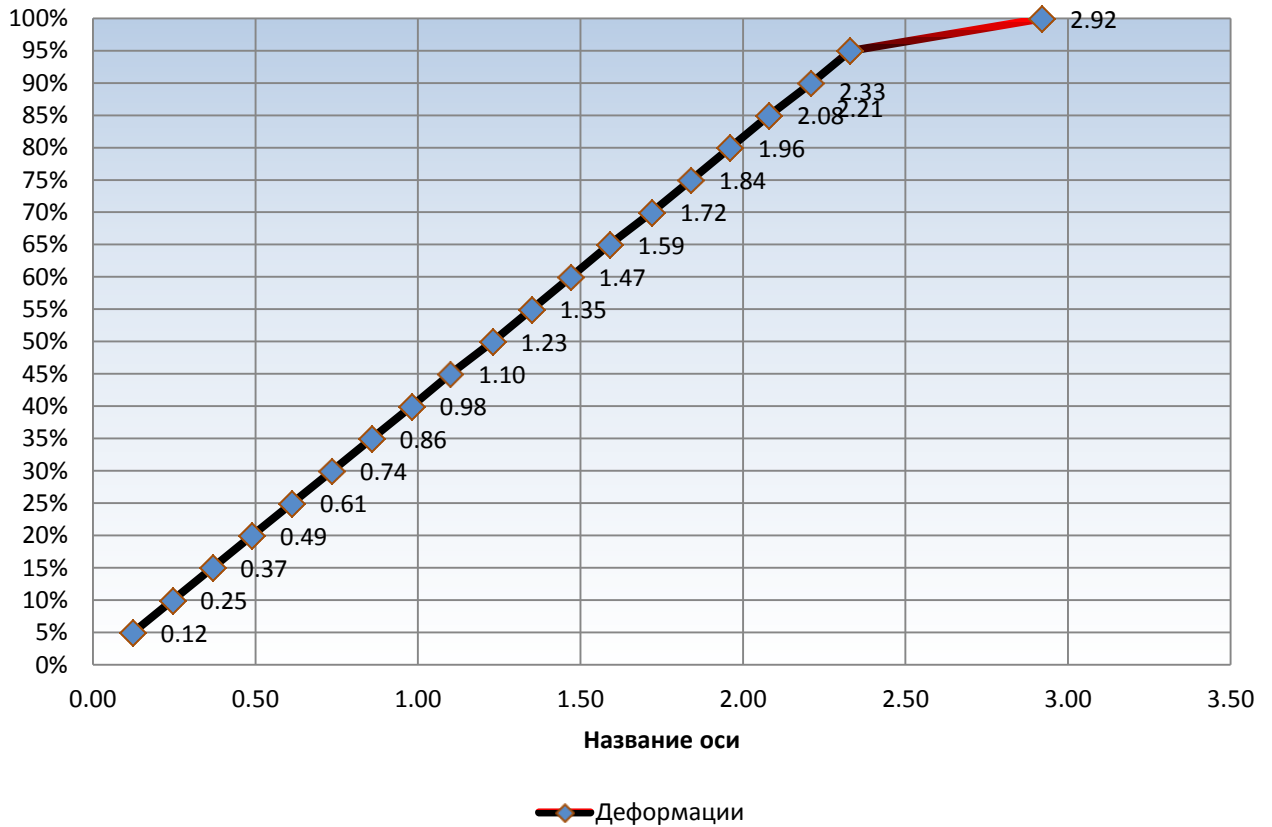
## **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

**(графики процесса потери устойчивости центрально-сжатых стержней в упругой и упруго-пластической стадиях)**

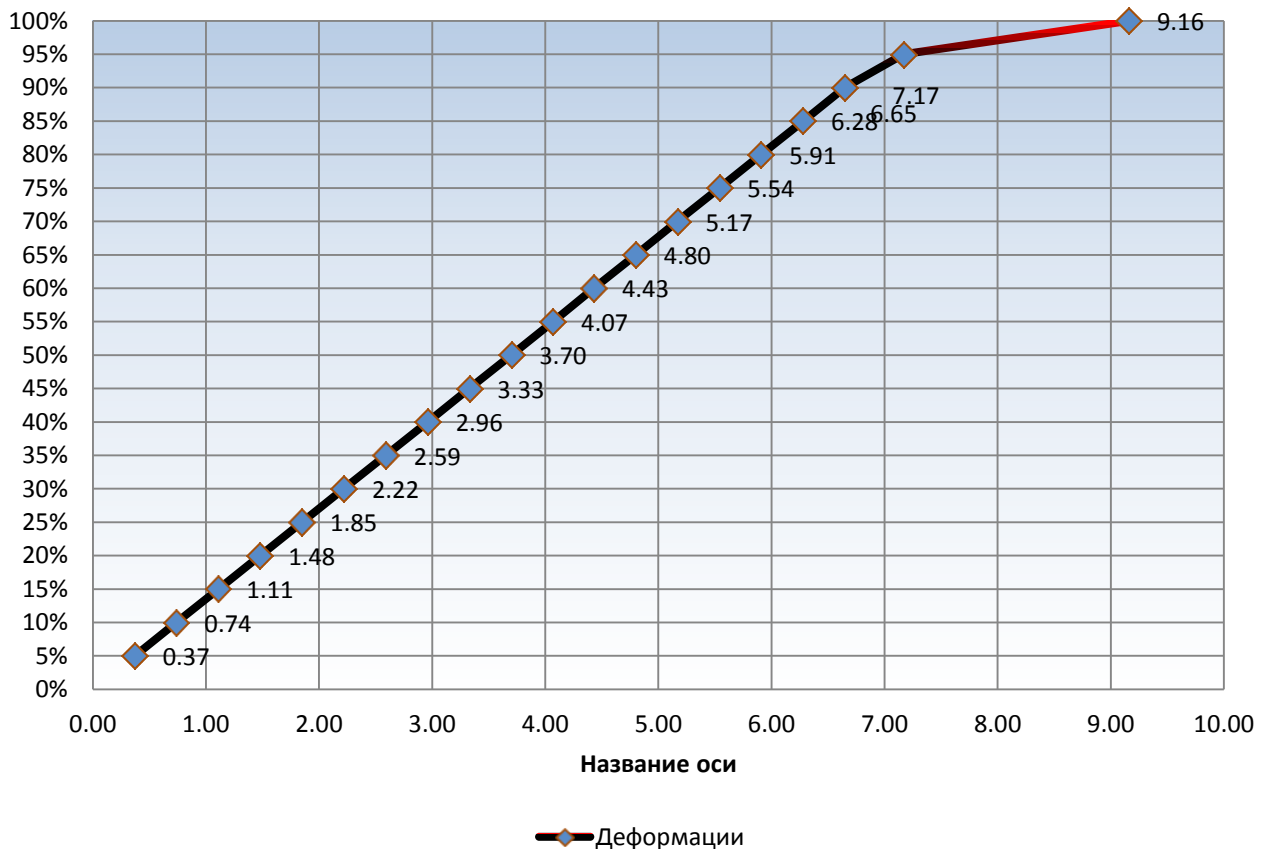
## 1.1. Потеря устойчивости стержней в упругой стадии работы материала



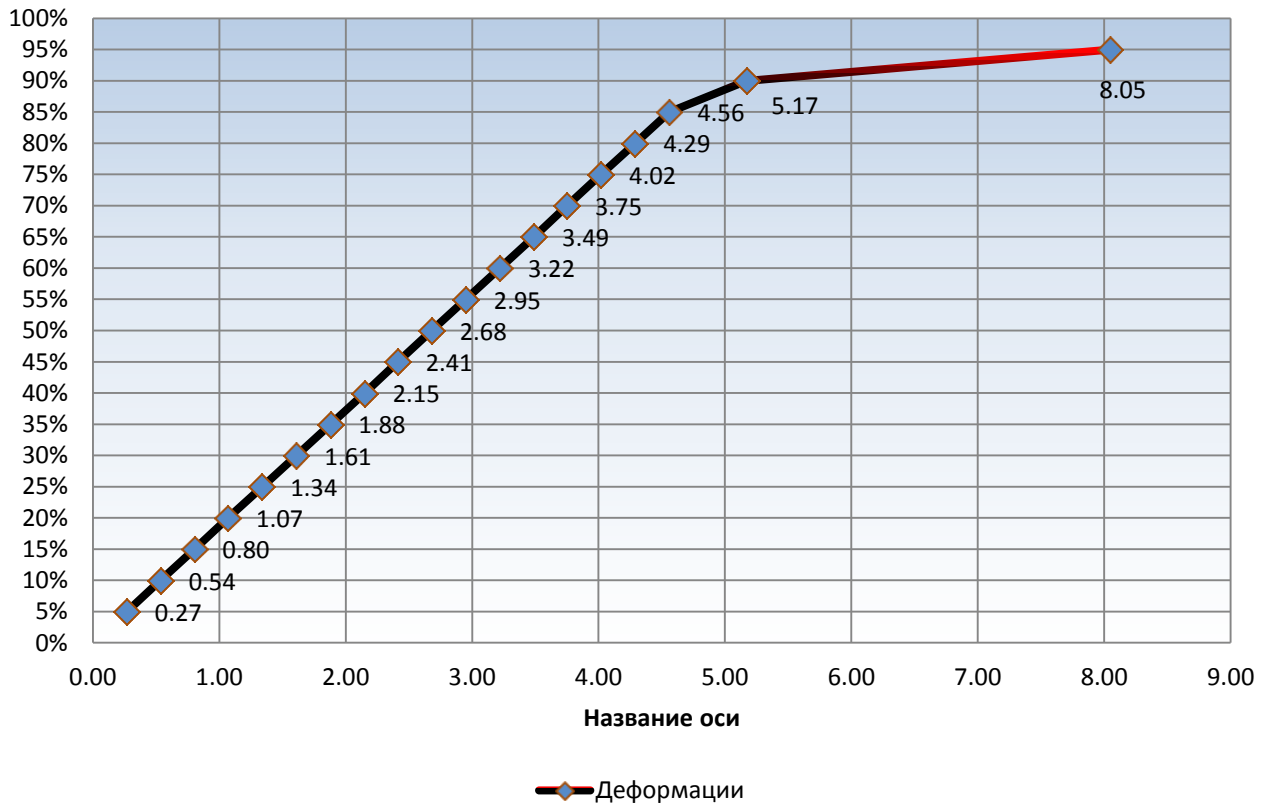
### Потеря устойчивости трубы 48x3 с $\lambda=120$



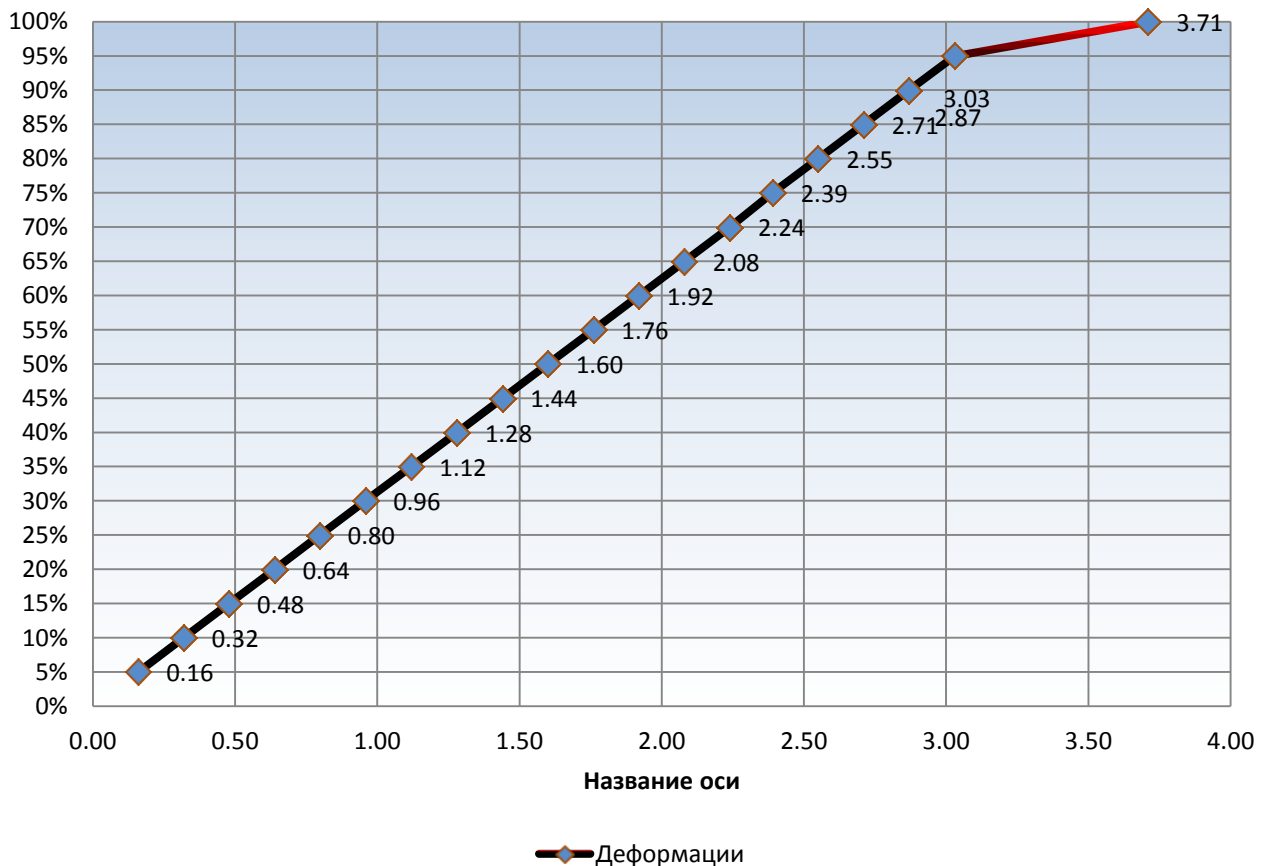
### Потеря устойчивости трубы 48x3 с $\lambda=110$



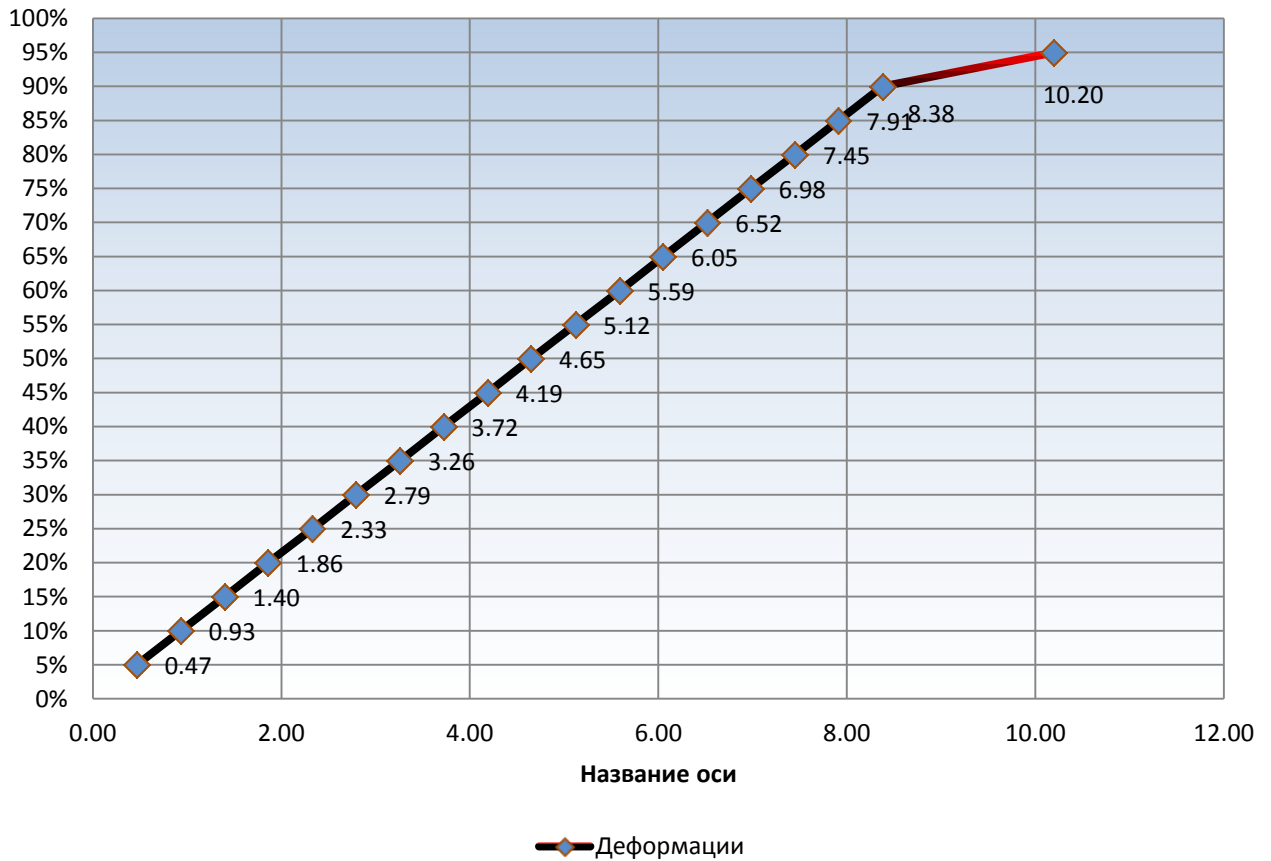
### Потеря устойчивости трубы 48x3 с $\lambda=100$



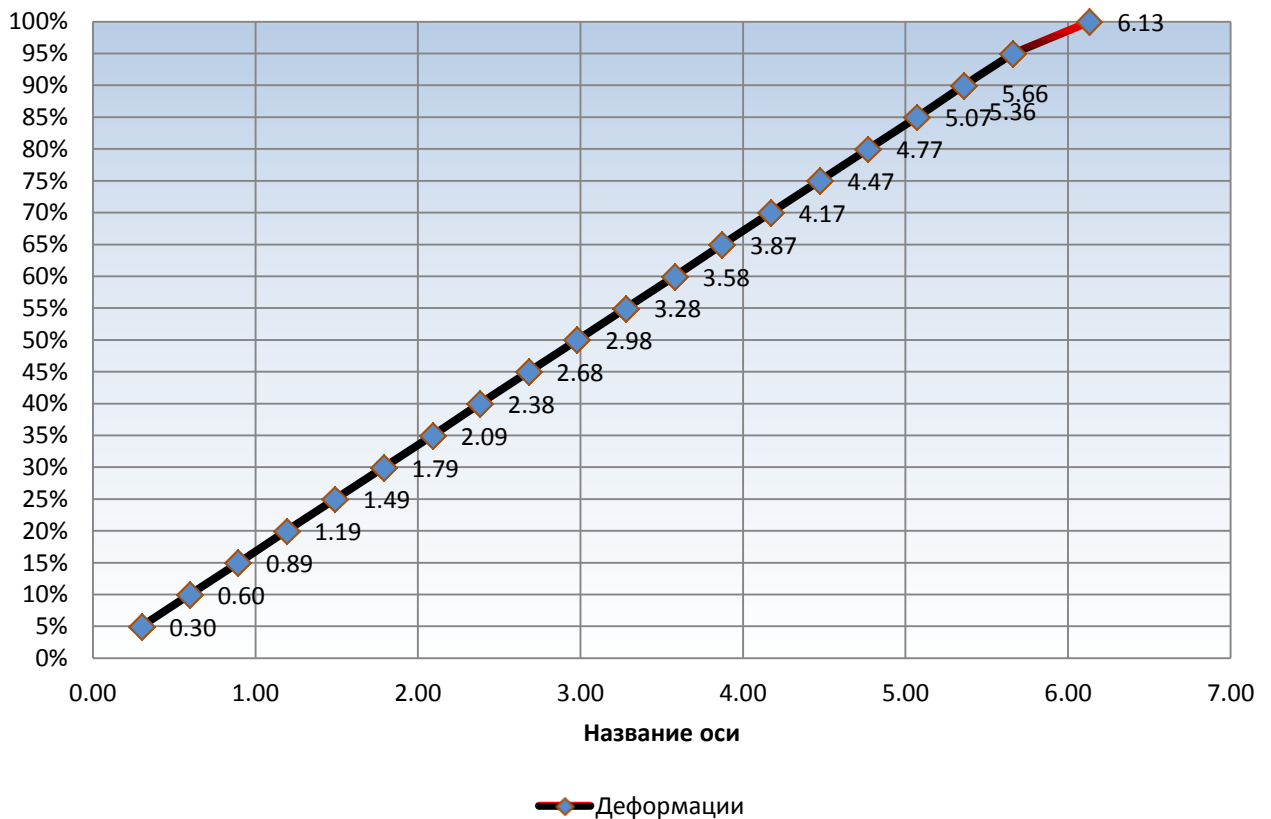
### Потеря устойчивости трубы 48x3 с $\lambda=90$



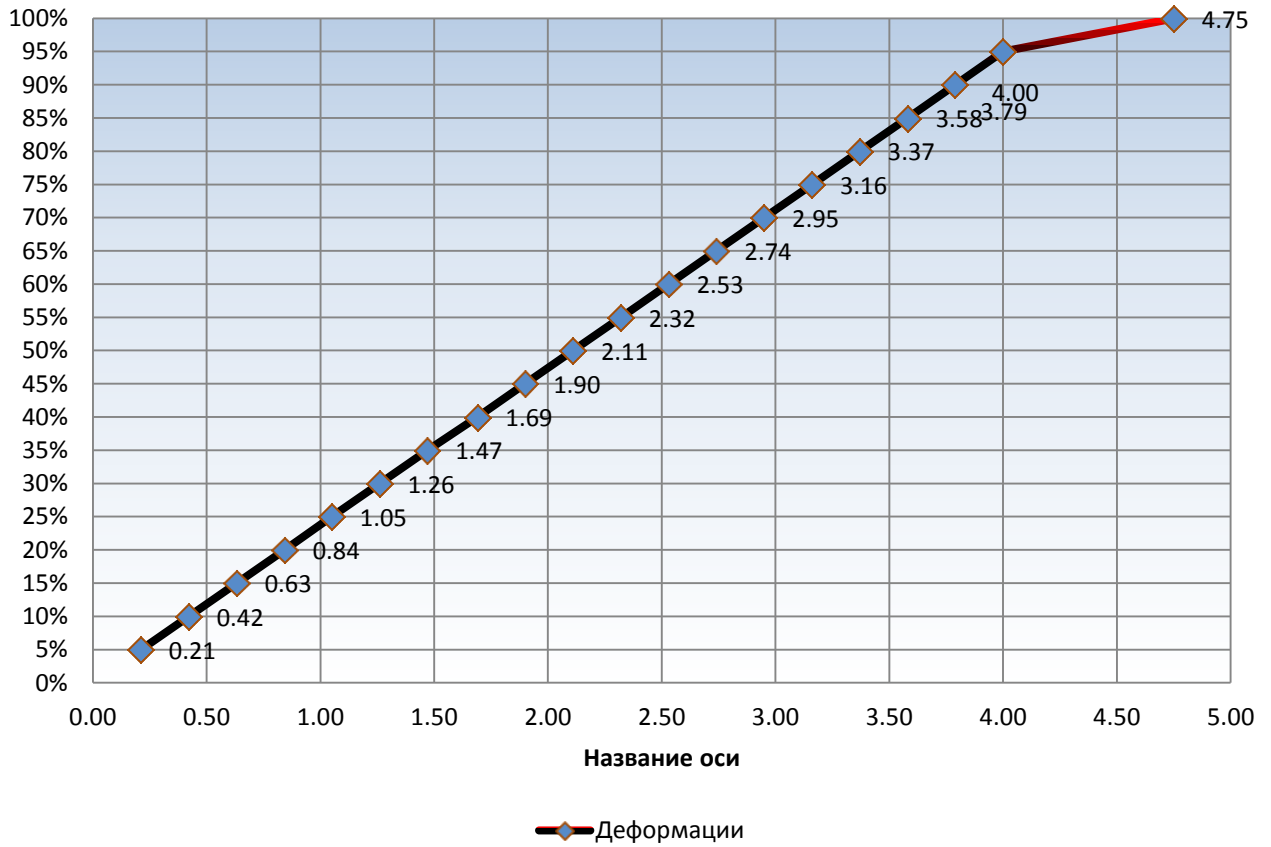
### Потеря устойчивости трубы 48x3 с $\lambda=80$



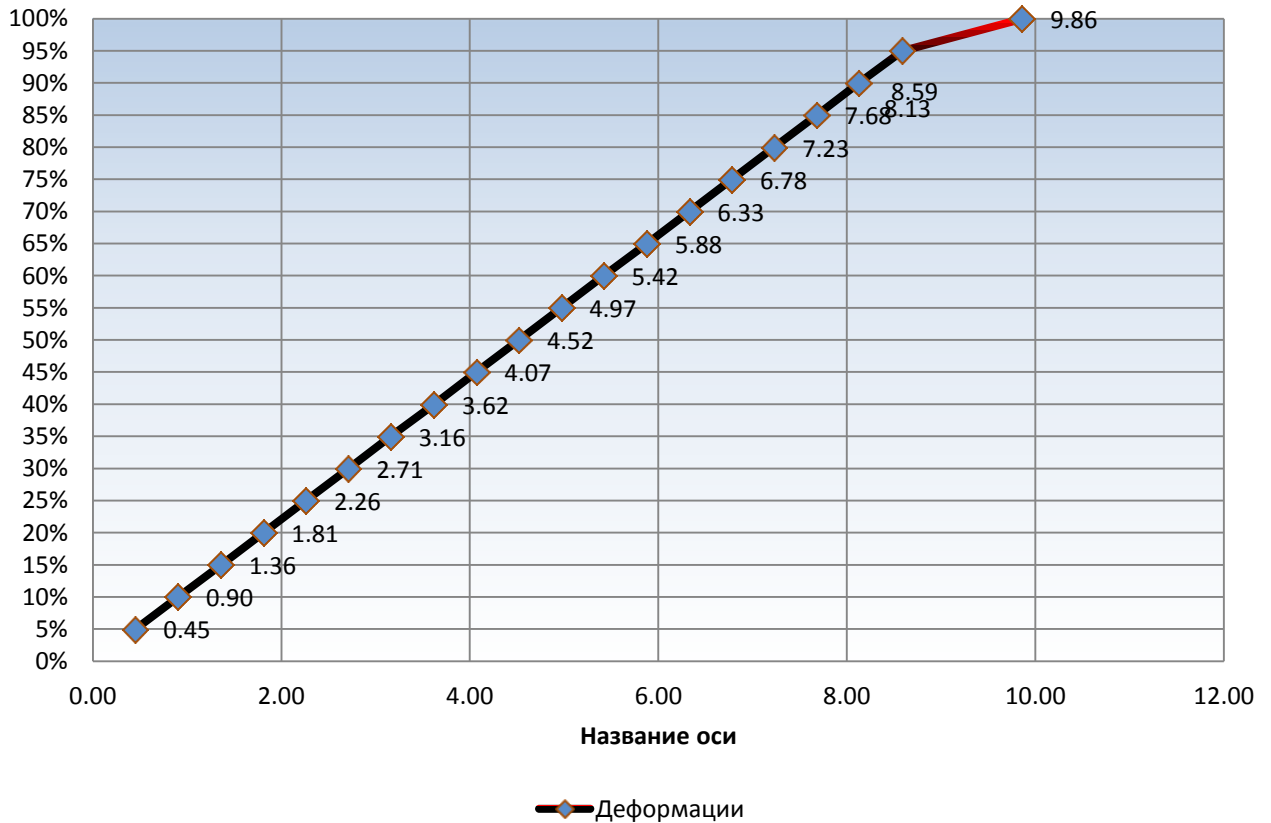
### Потеря устойчивости трубы 48x3 с $\lambda=70$



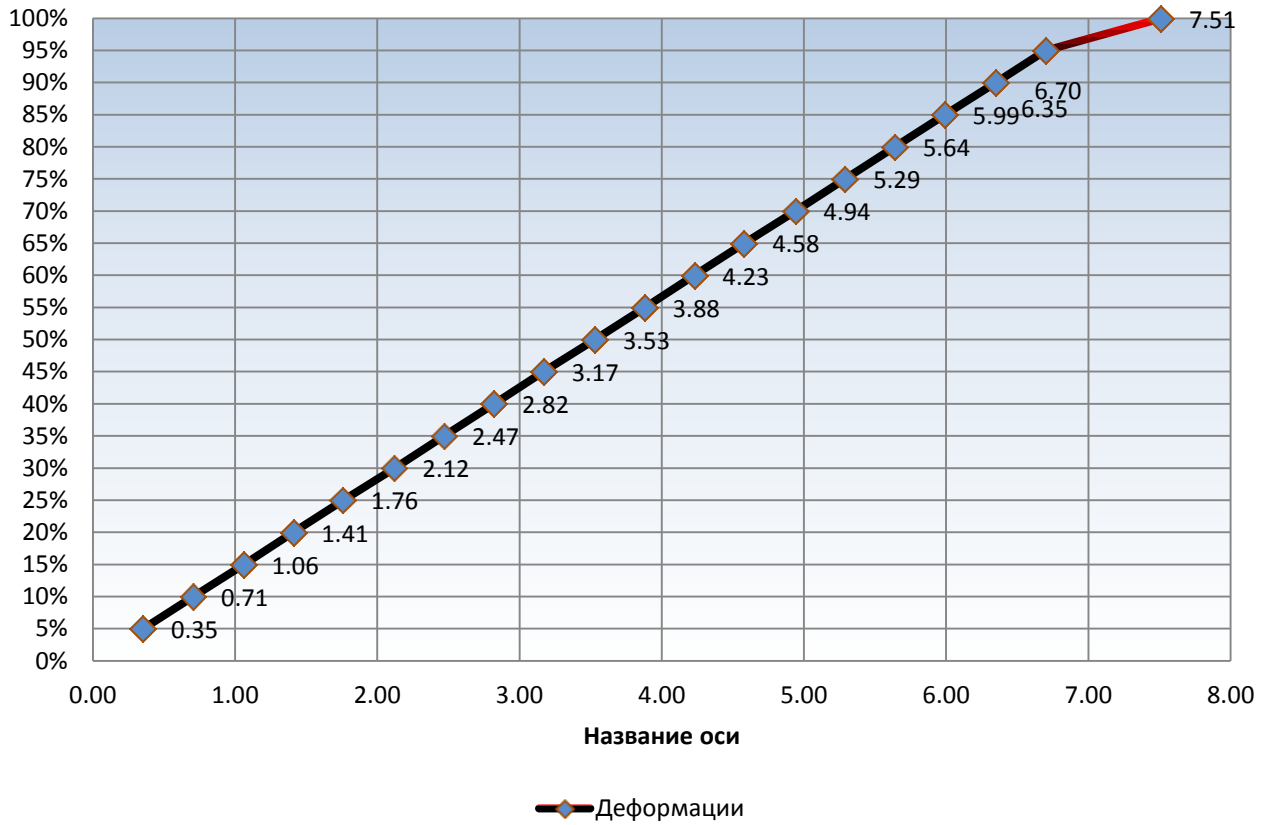
### Потеря устойчивости трубы 48x3 с $\lambda=60$



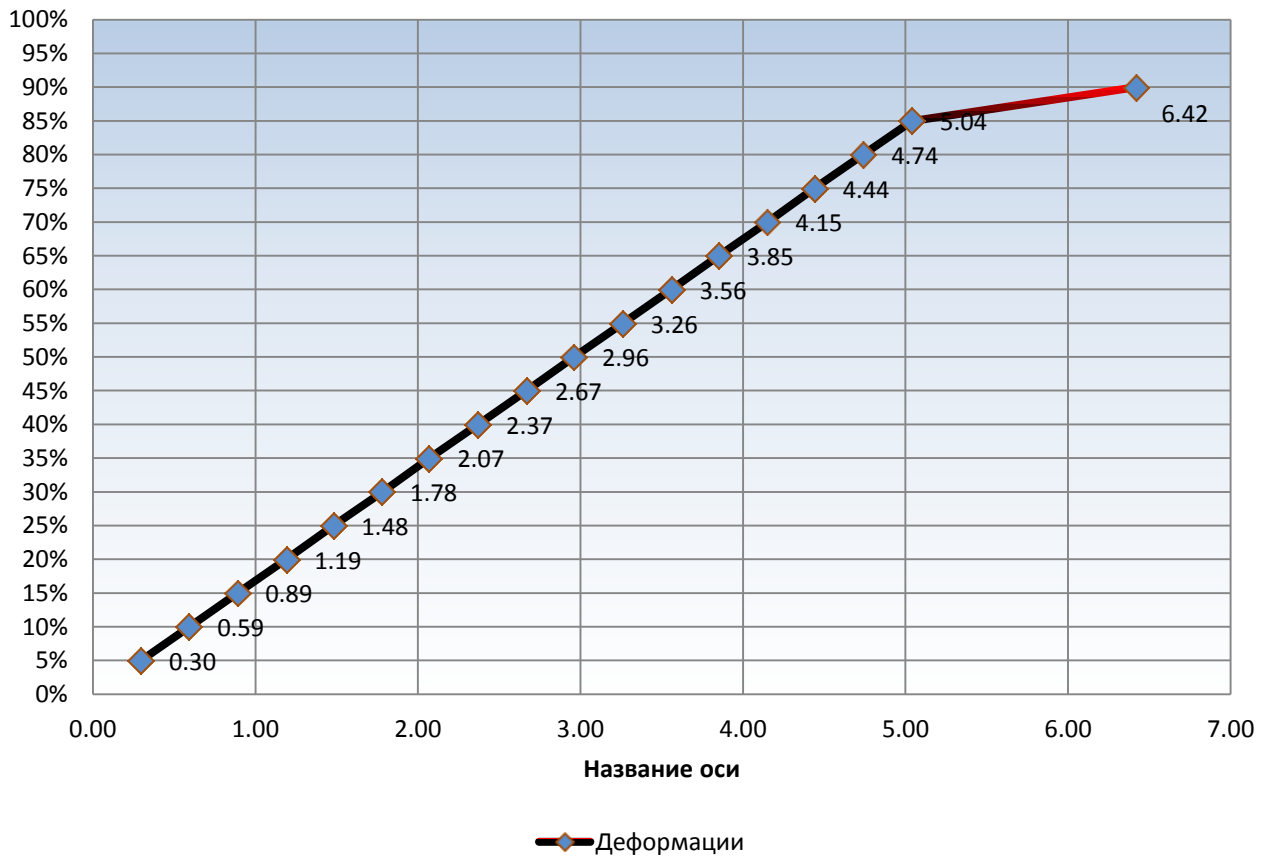
### Потеря устойчивости трубы 48x3 с $\lambda=50$



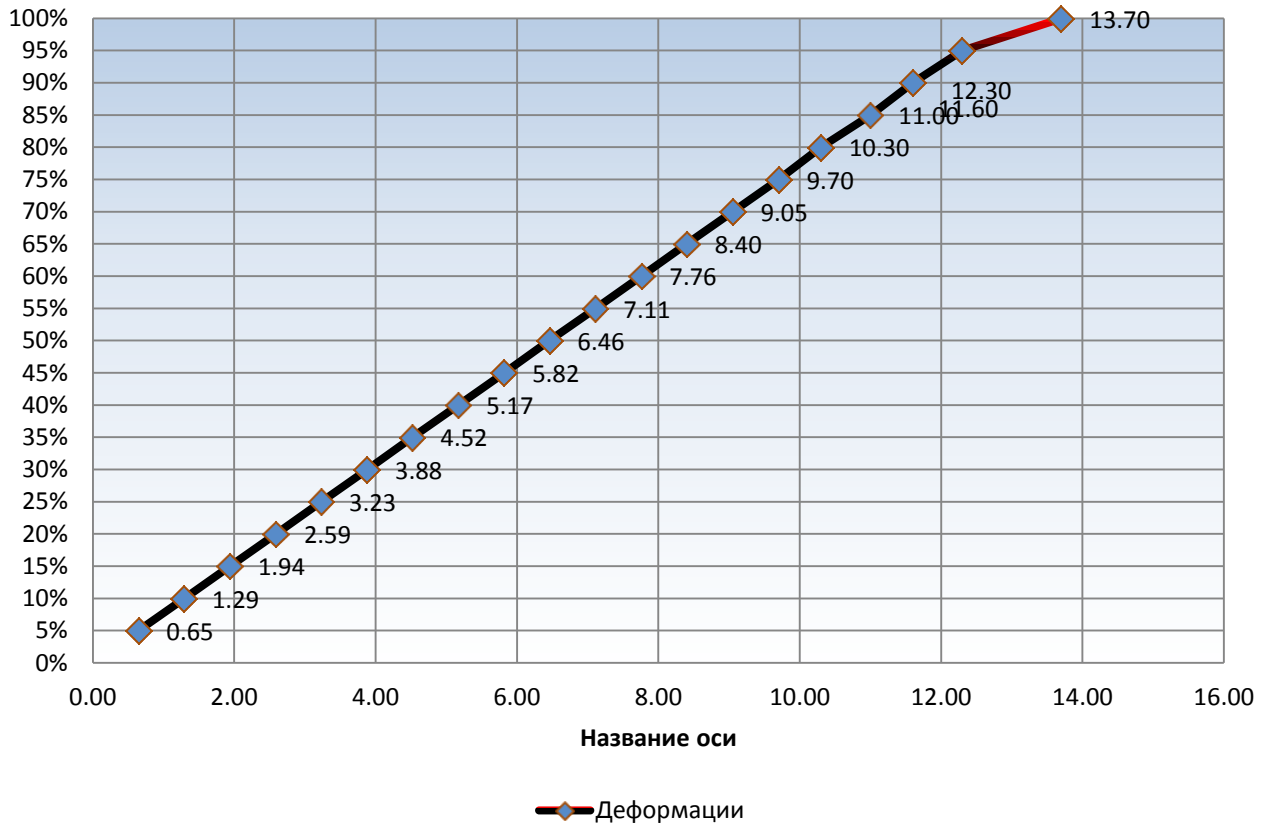
### Потеря устойчивости трубы 159x12 с $\lambda=140$



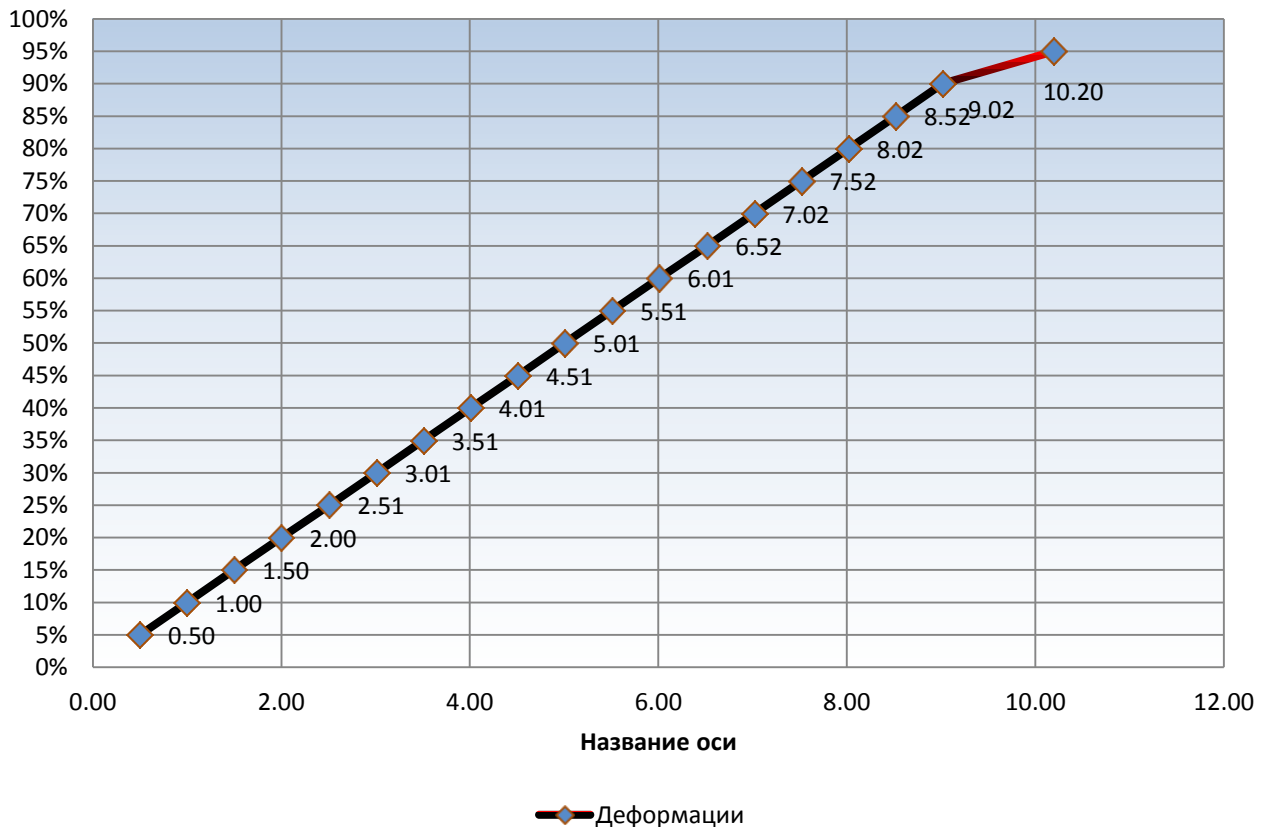
### Потеря устойчивости трубы 159x12 с $\lambda=130$



### Потеря устойчивости трубы 159x12 с $\lambda=120$

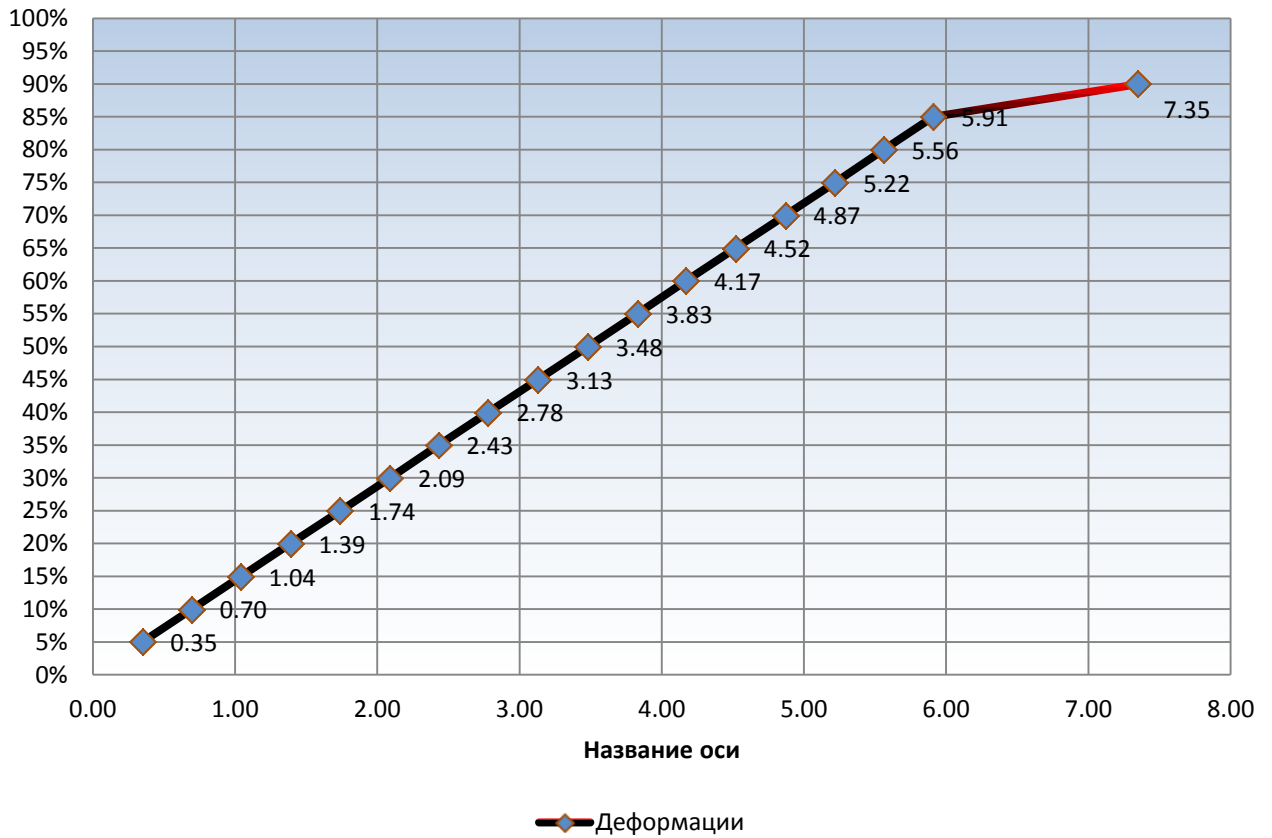


### Потеря устойчивости трубы 159x12 с $\lambda=110$

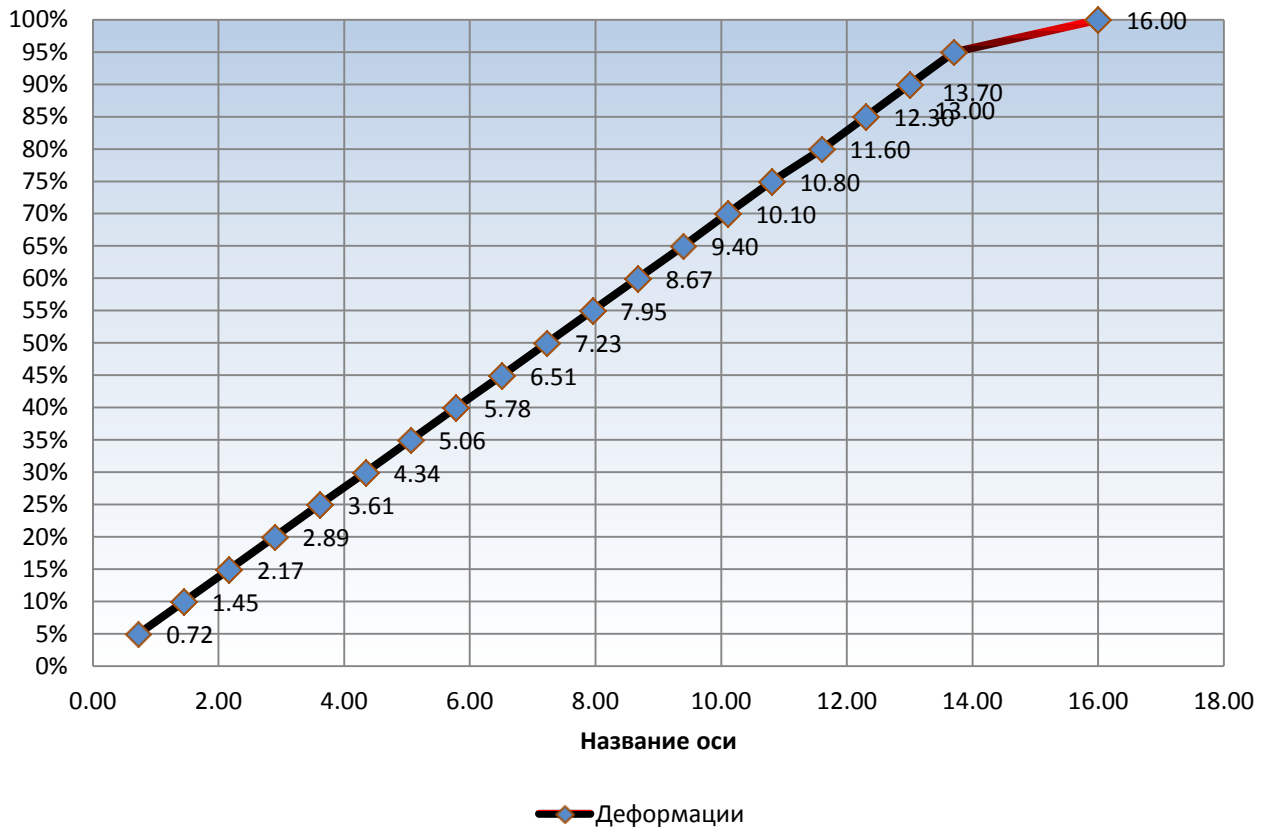




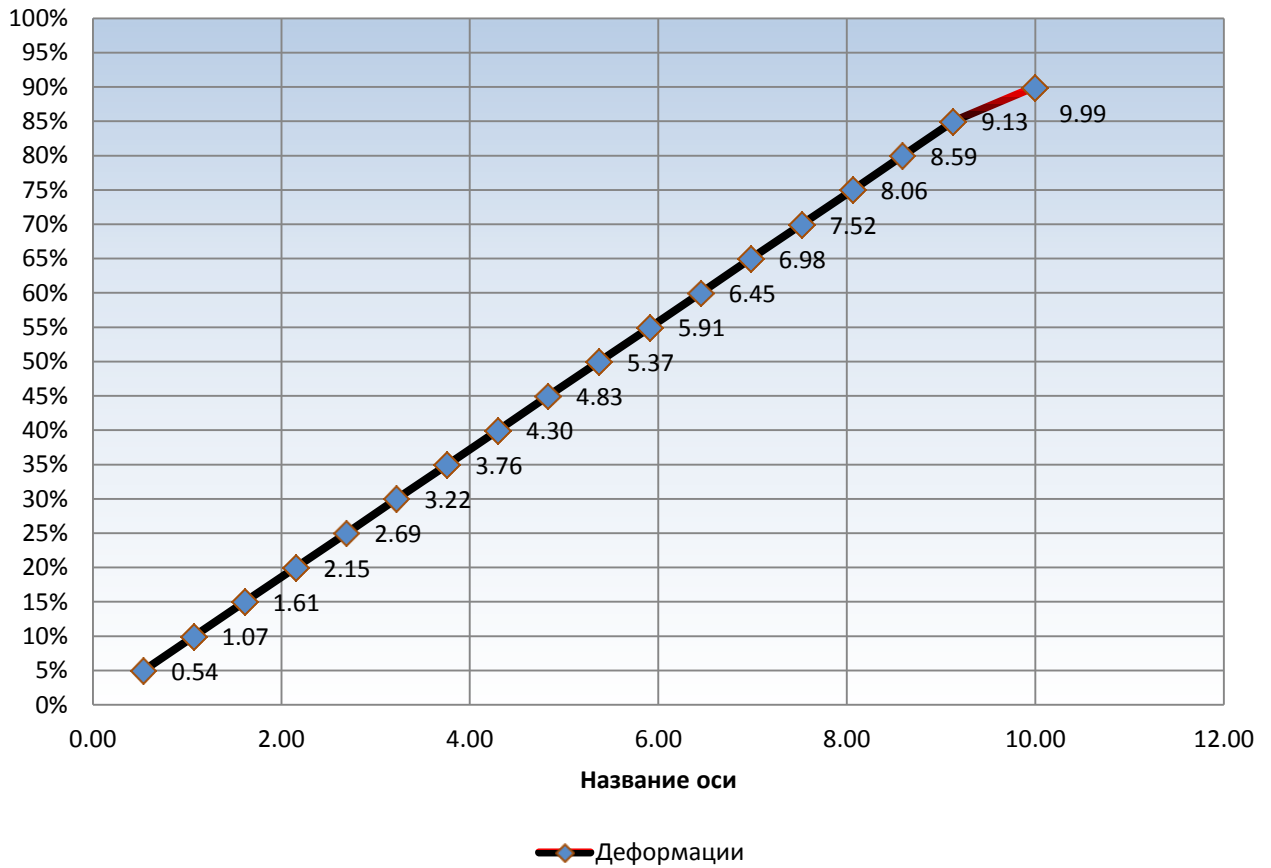
### Потеря устойчивости трубы 159x12 с $\lambda=100$



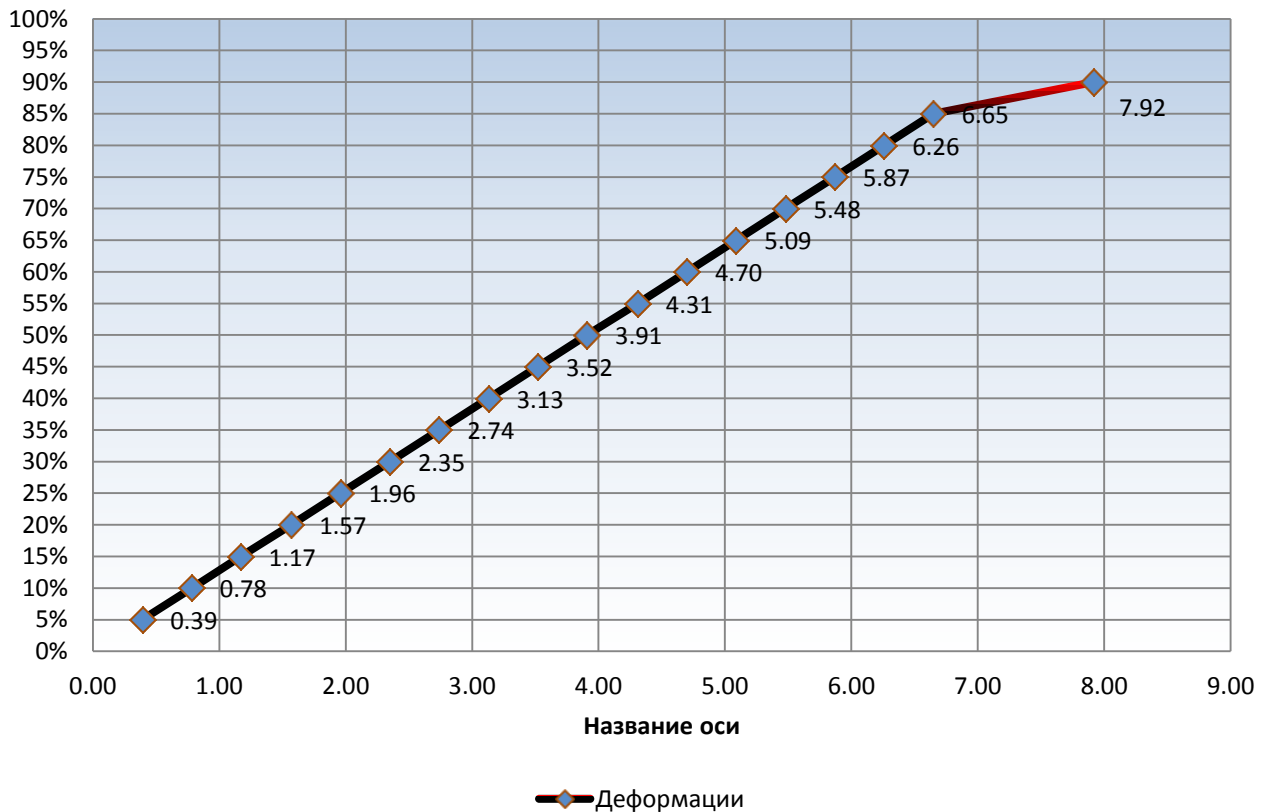
### Потеря устойчивости трубы 159x12 с $\lambda=90$



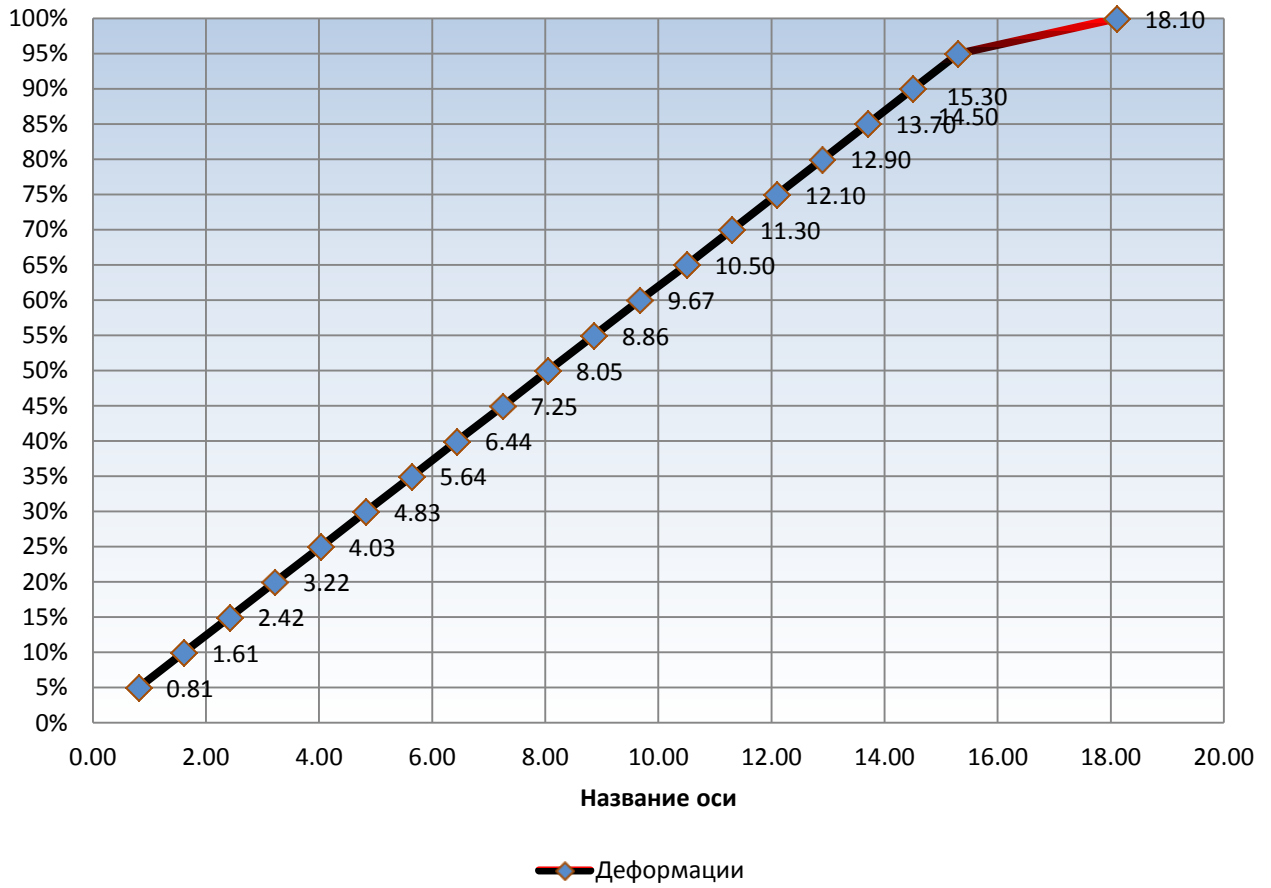
### Потеря устойчивости трубы 159x12 с $\lambda=80$



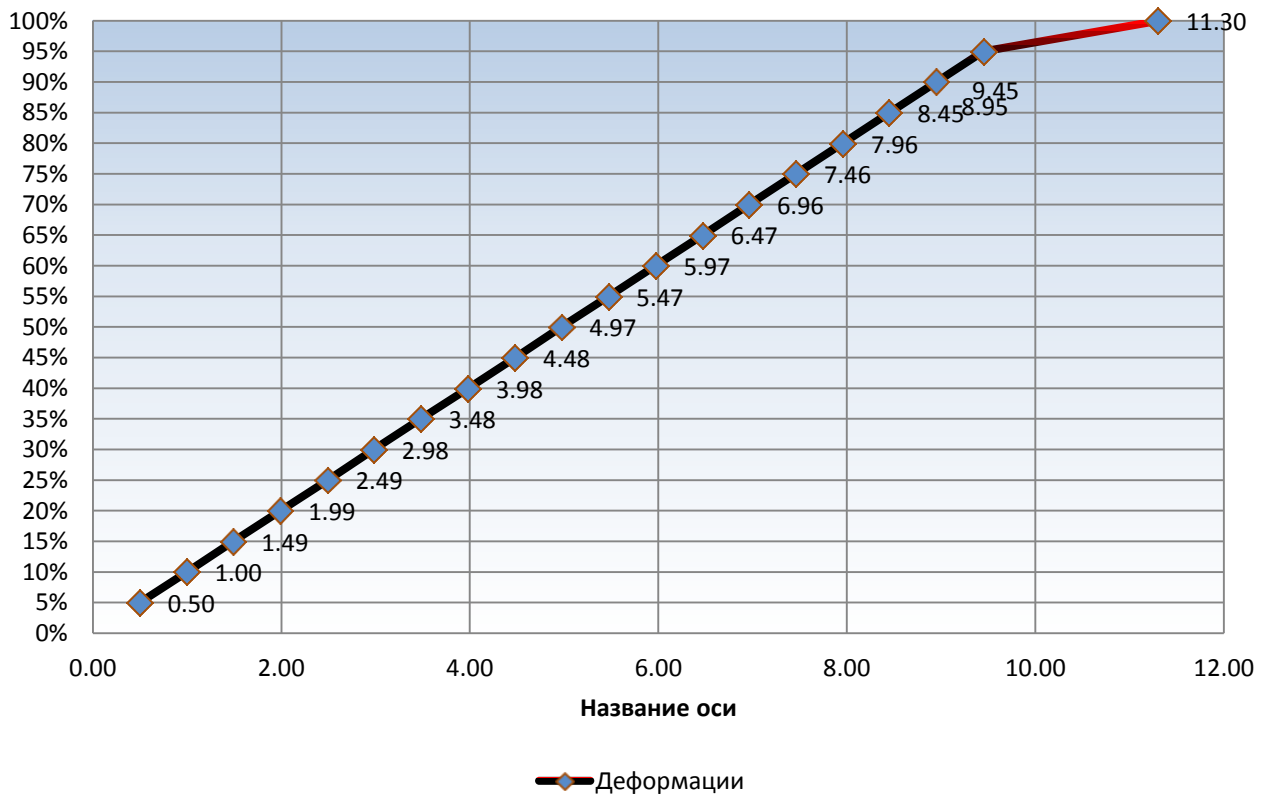
### Потеря устойчивости трубы 159x12 с $\lambda=70$



### Потеря устойчивости трубы 159x12 с $\lambda=60$



### Потеря устойчивости трубы 159x12 с $\lambda=50$



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

**(зависимости варьируемых параметров покрытия при решении  
оптимизационной задачи на неподвижном и податливом контурах)**

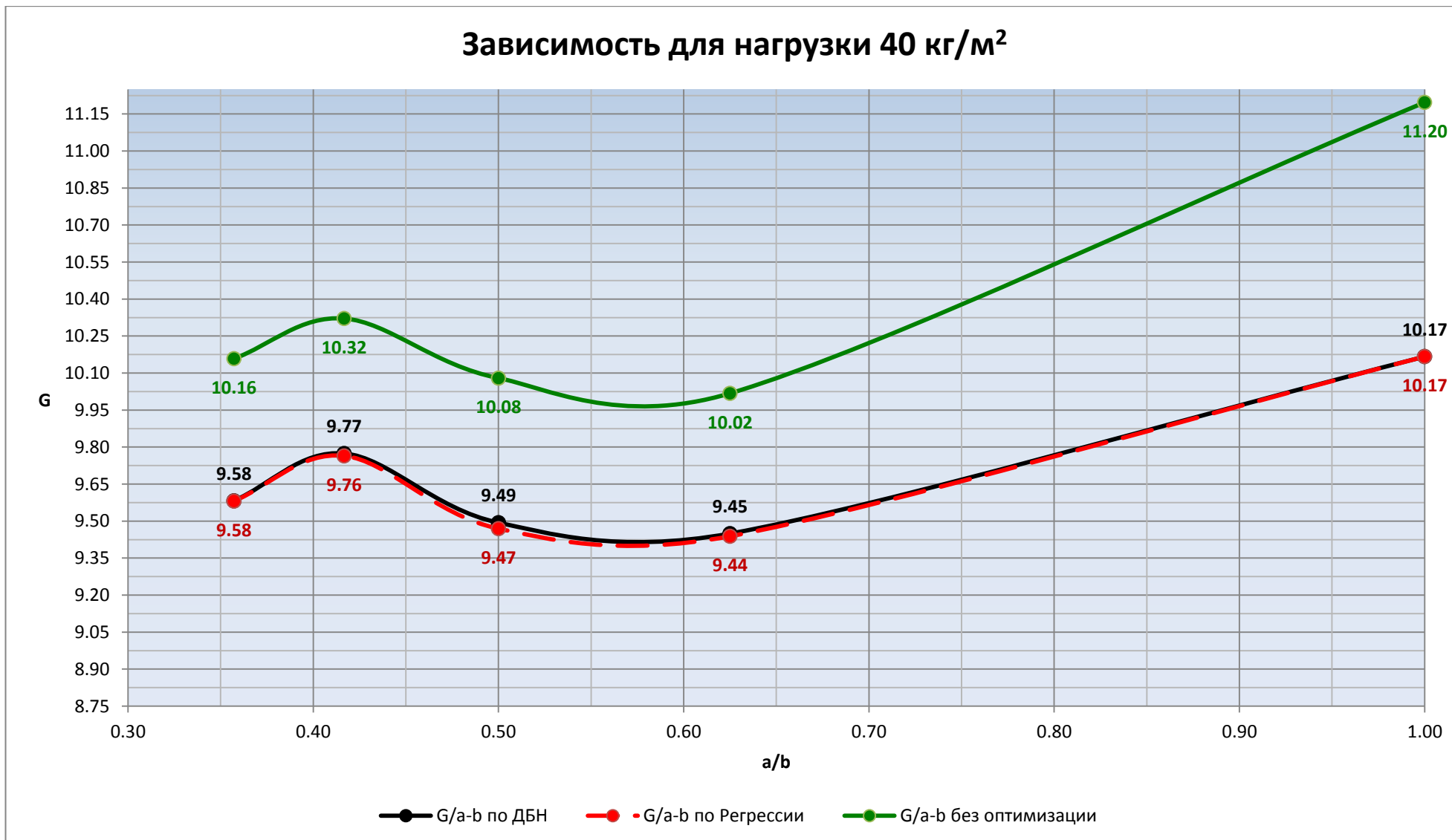


Рисунок Б.1 – Зависимость «Удельная масса конструкции – соотношение сторон в плане» при нагрузке 40 кг/м<sup>2</sup>

### Зависимость для нагрузки $100 \text{ кг/м}^2$

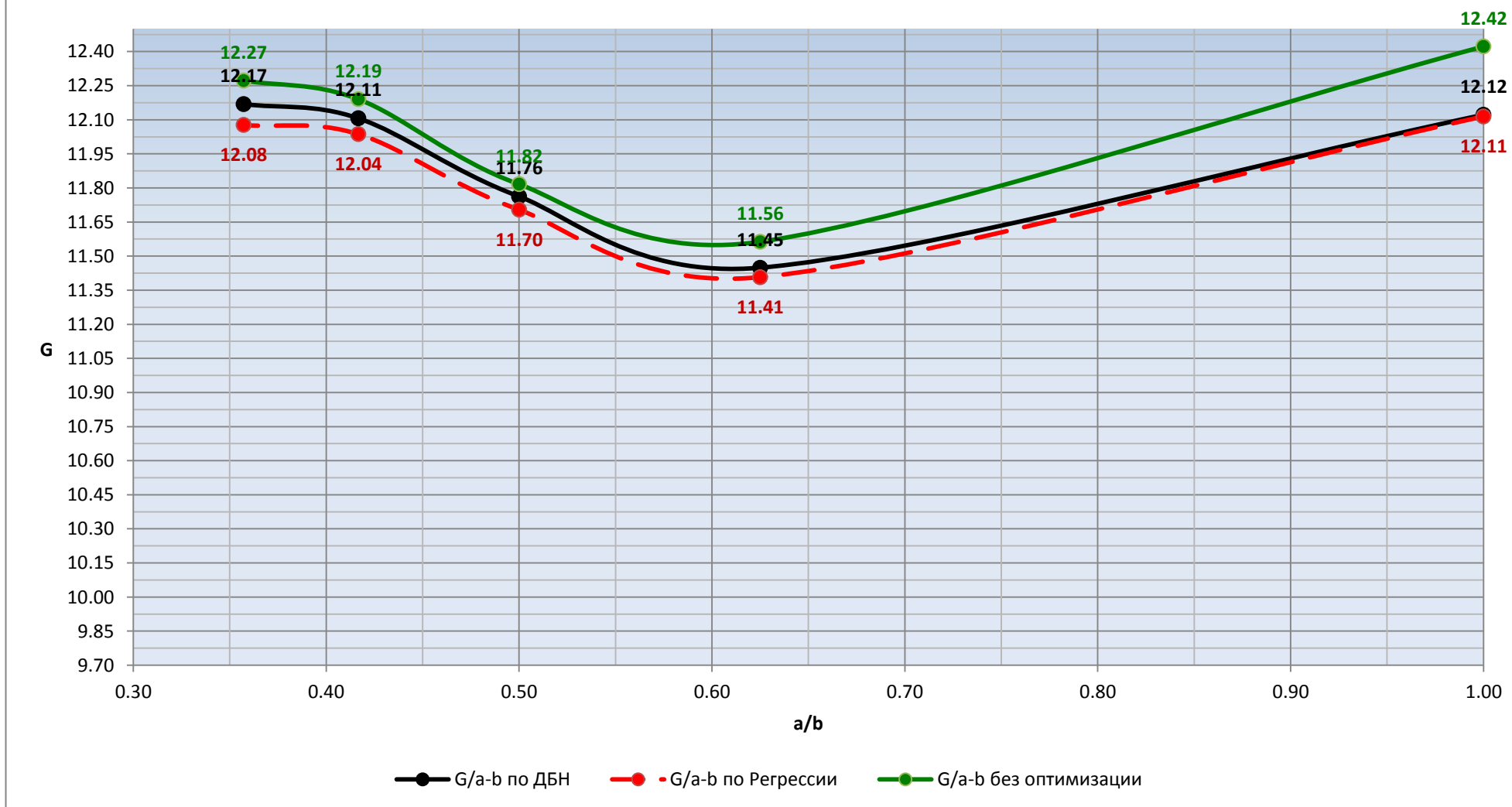


Рисунок Б.2 – Зависимость «Удельная масса конструкции – соотношение сторон в плане»  $100 \text{ кг/м}^2$

### Зависимость для нагрузки $160 \text{ кг/м}^2$

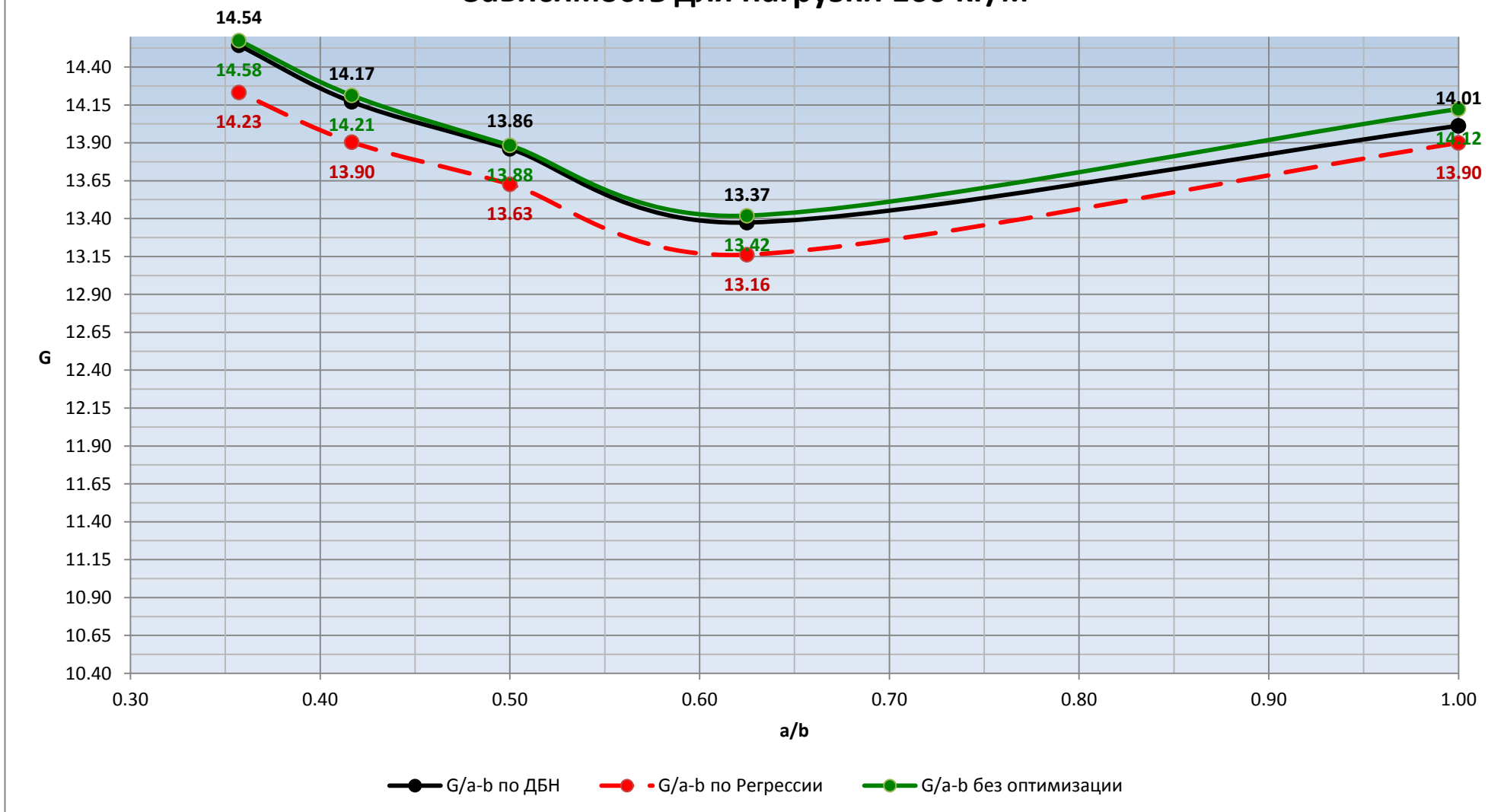


Рисунок Б.3 – Зависимость «Удельная масса конструкции – соотношение сторон в плане»  $160 \text{ кг/м}^2$

### Зависимость для нагрузки 240 кг/м<sup>2</sup>

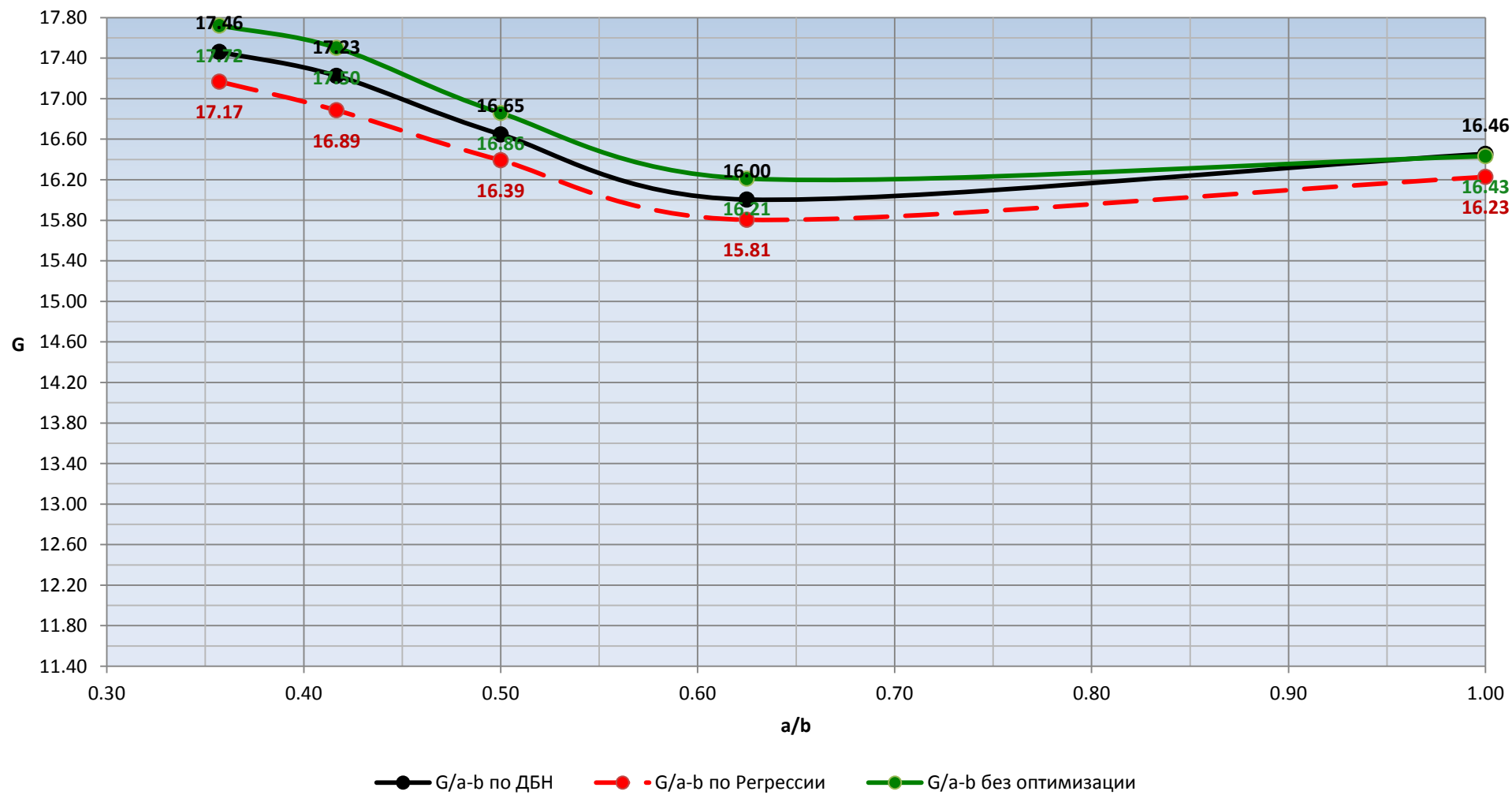


Рисунок Б.4 – Зависимость «Удельная масса конструкции – соотношение сторон в плане» 240 кг/м<sup>2</sup>



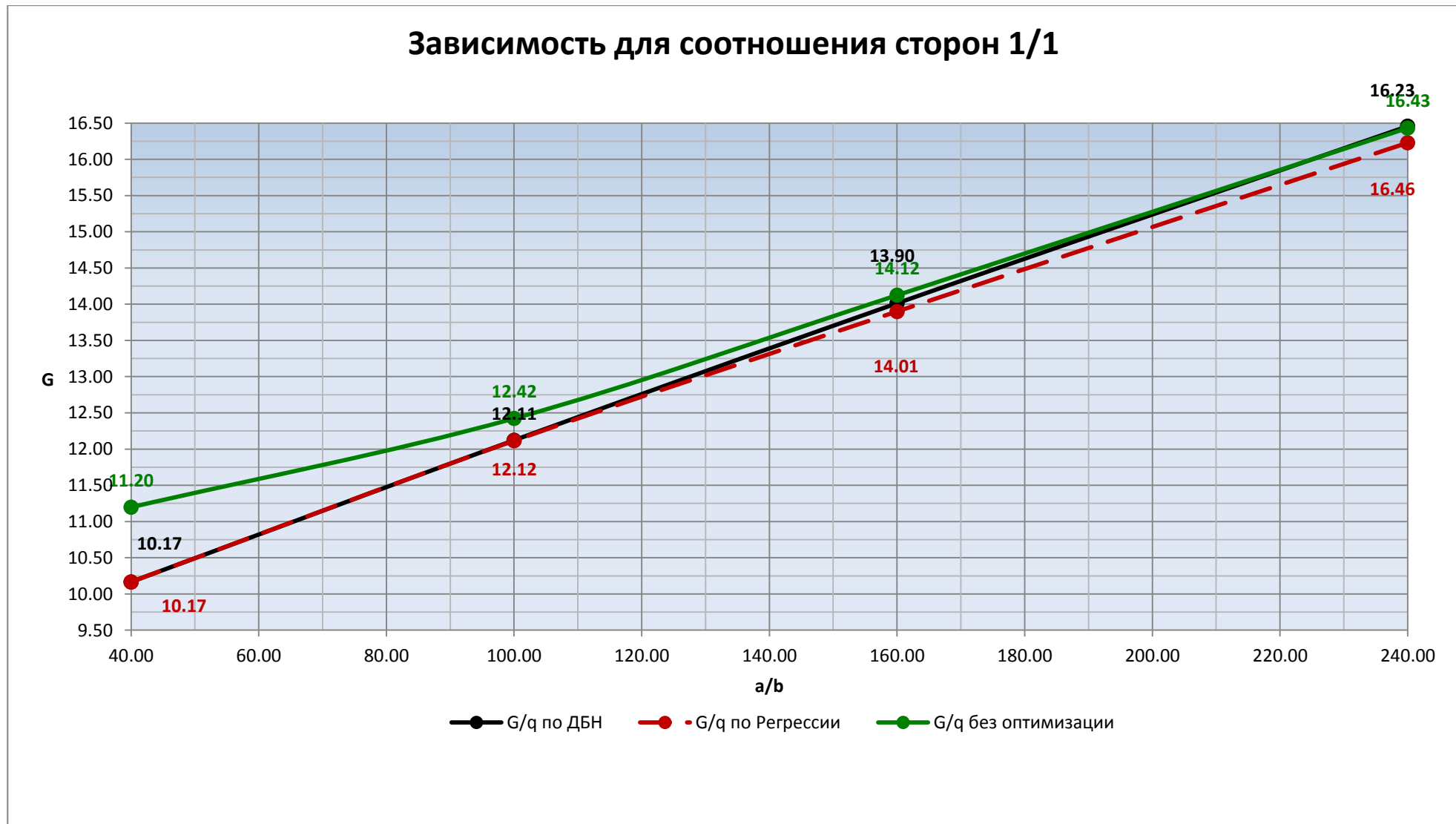


Рисунок Б.5 – Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» для соотношения 1/1

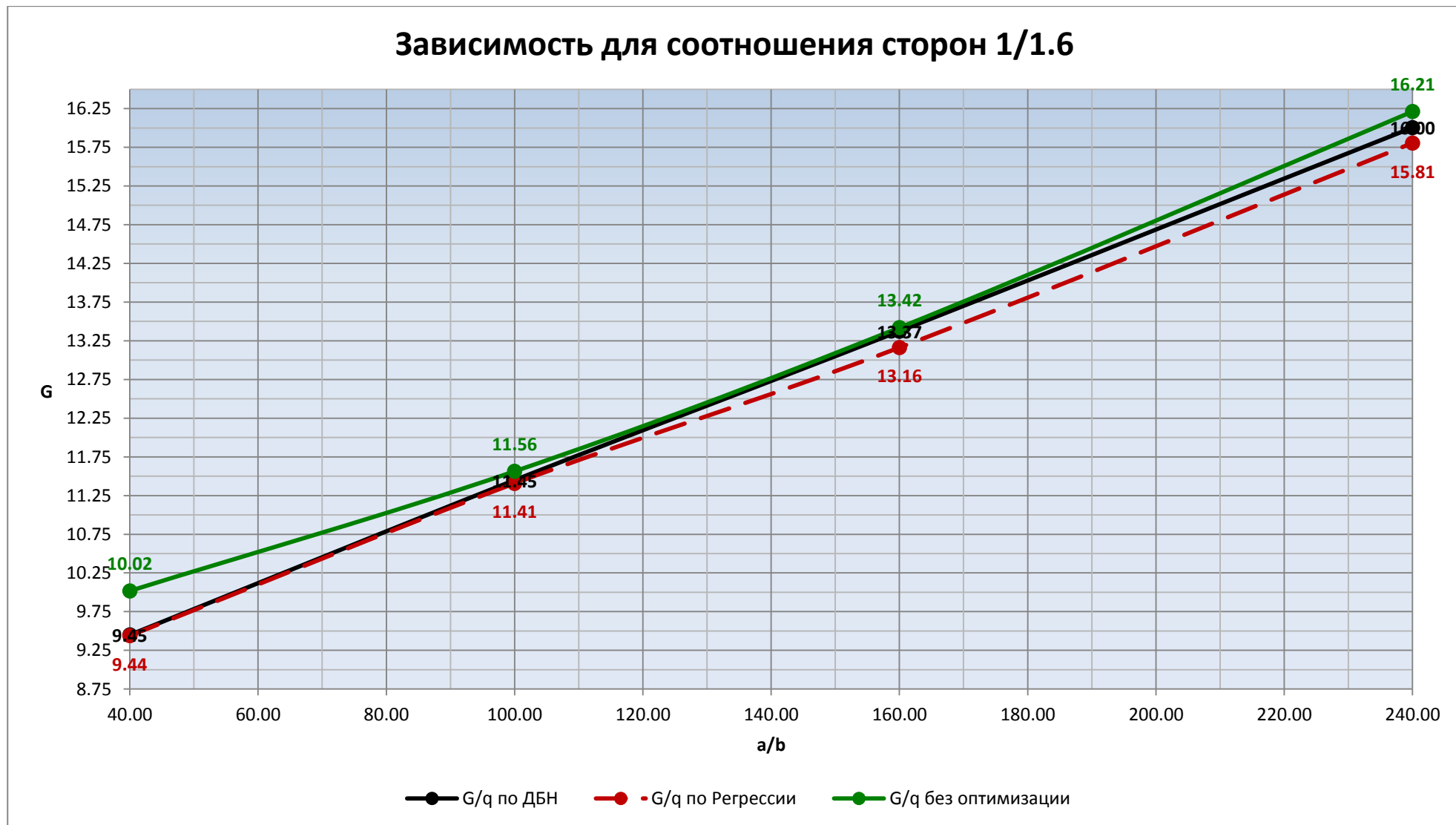


Рисунок Б.6 – Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» для соотношения сторон 1/1.6

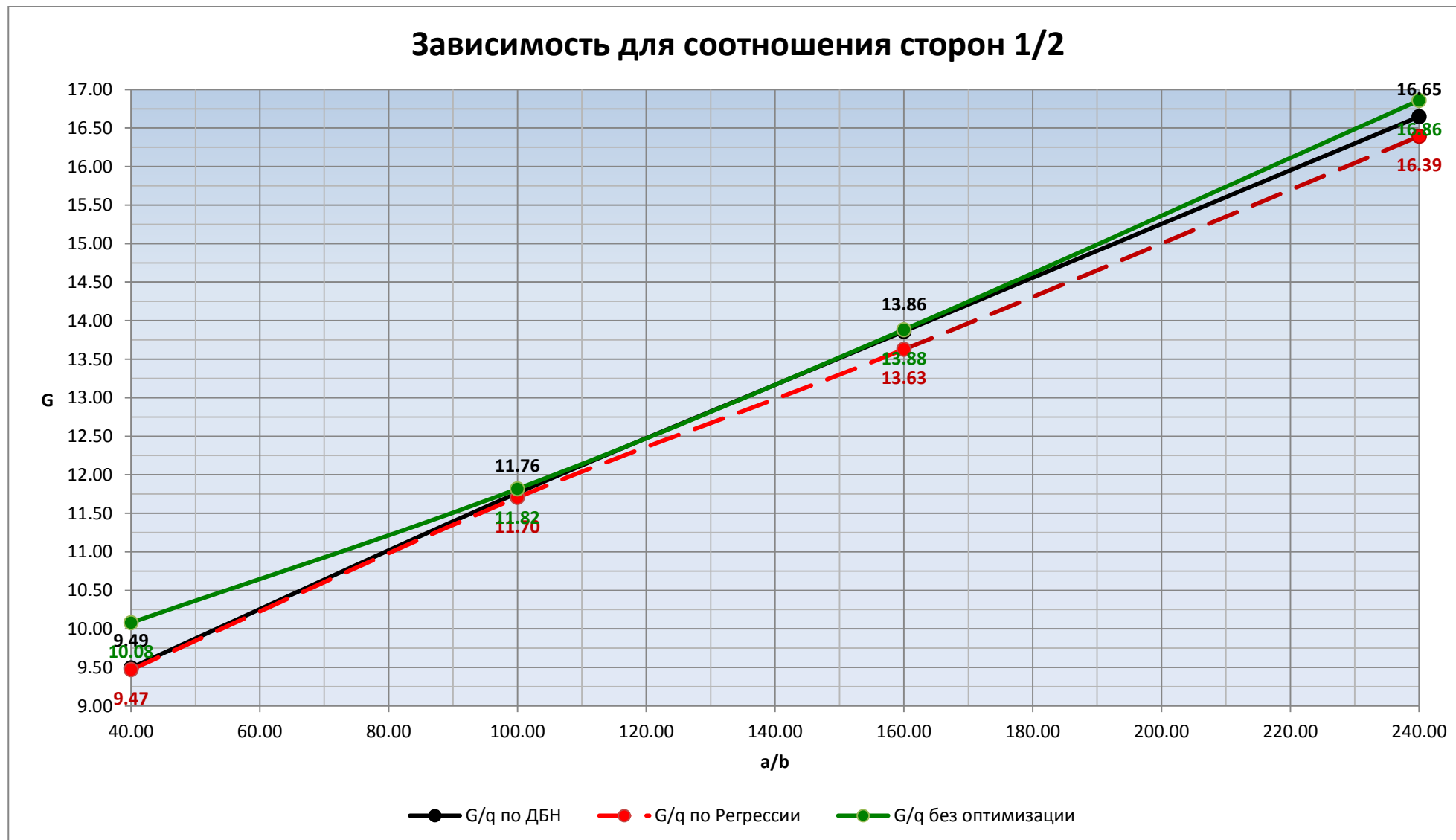


Рисунок Б.7 – Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» для соотношения сторон 1/2

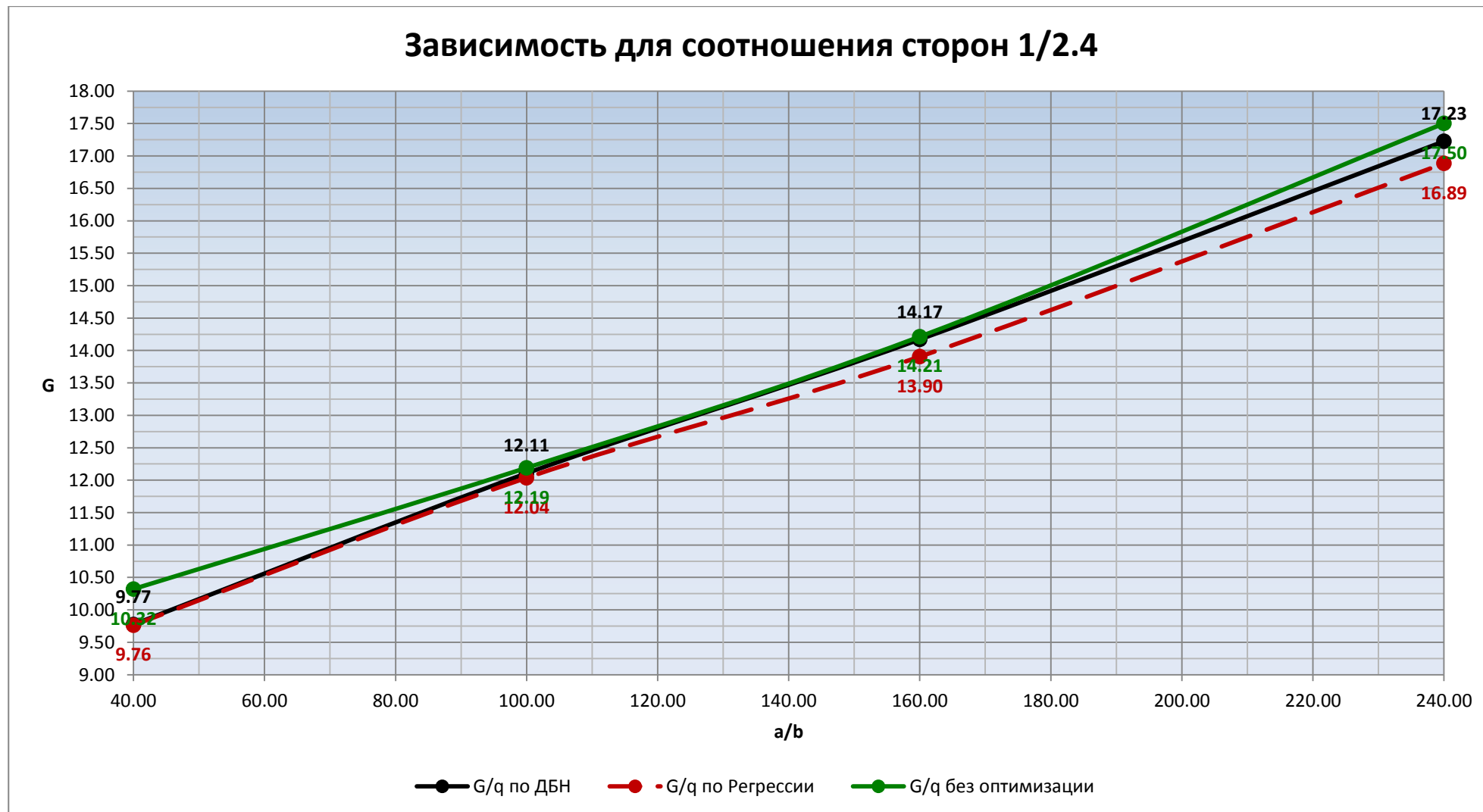


Рисунок Б.8 – Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» для соотношения сторон 1/2.4

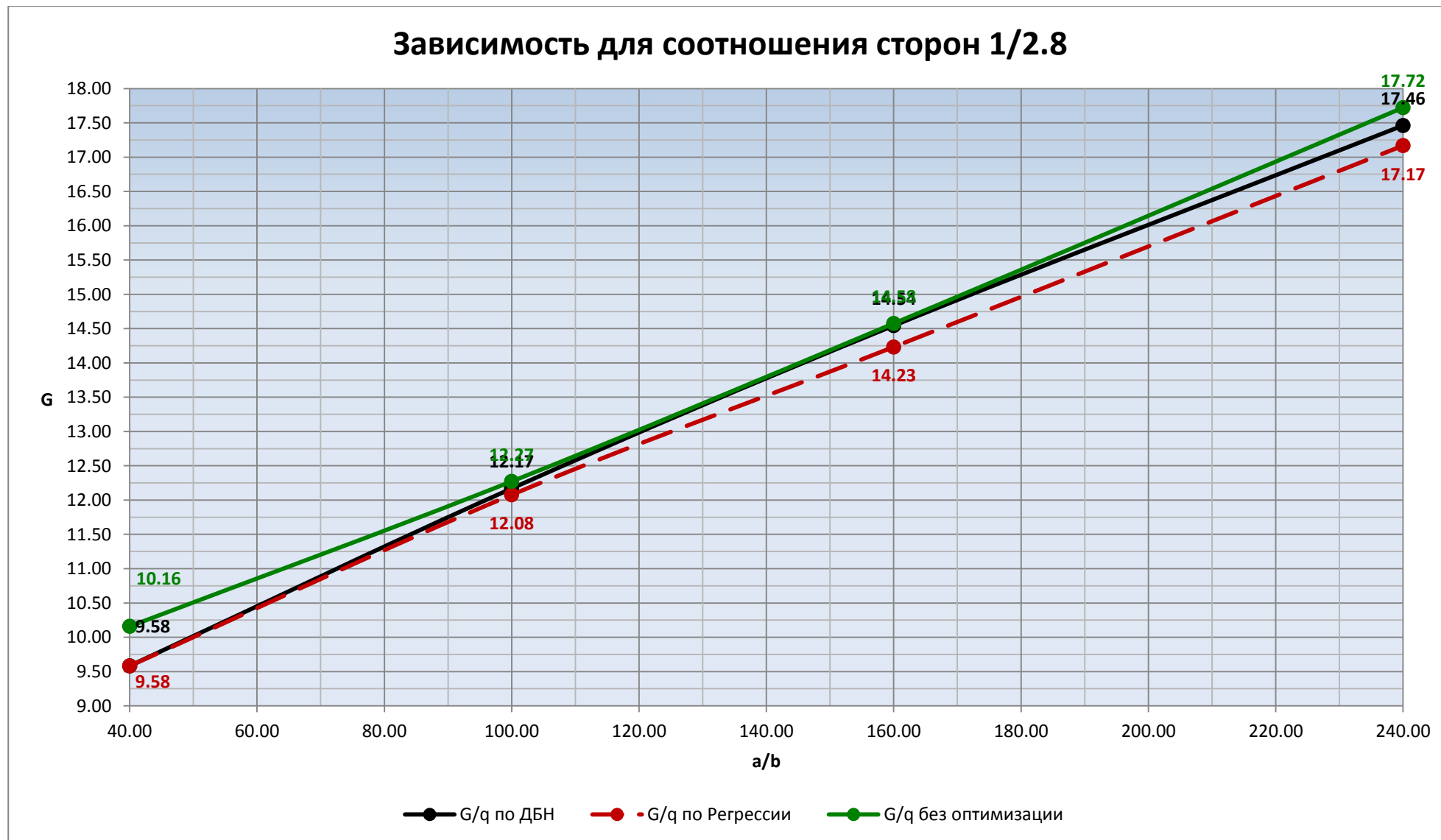


Рисунок Б.9 – Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» для соотношения сторон 1/2.8

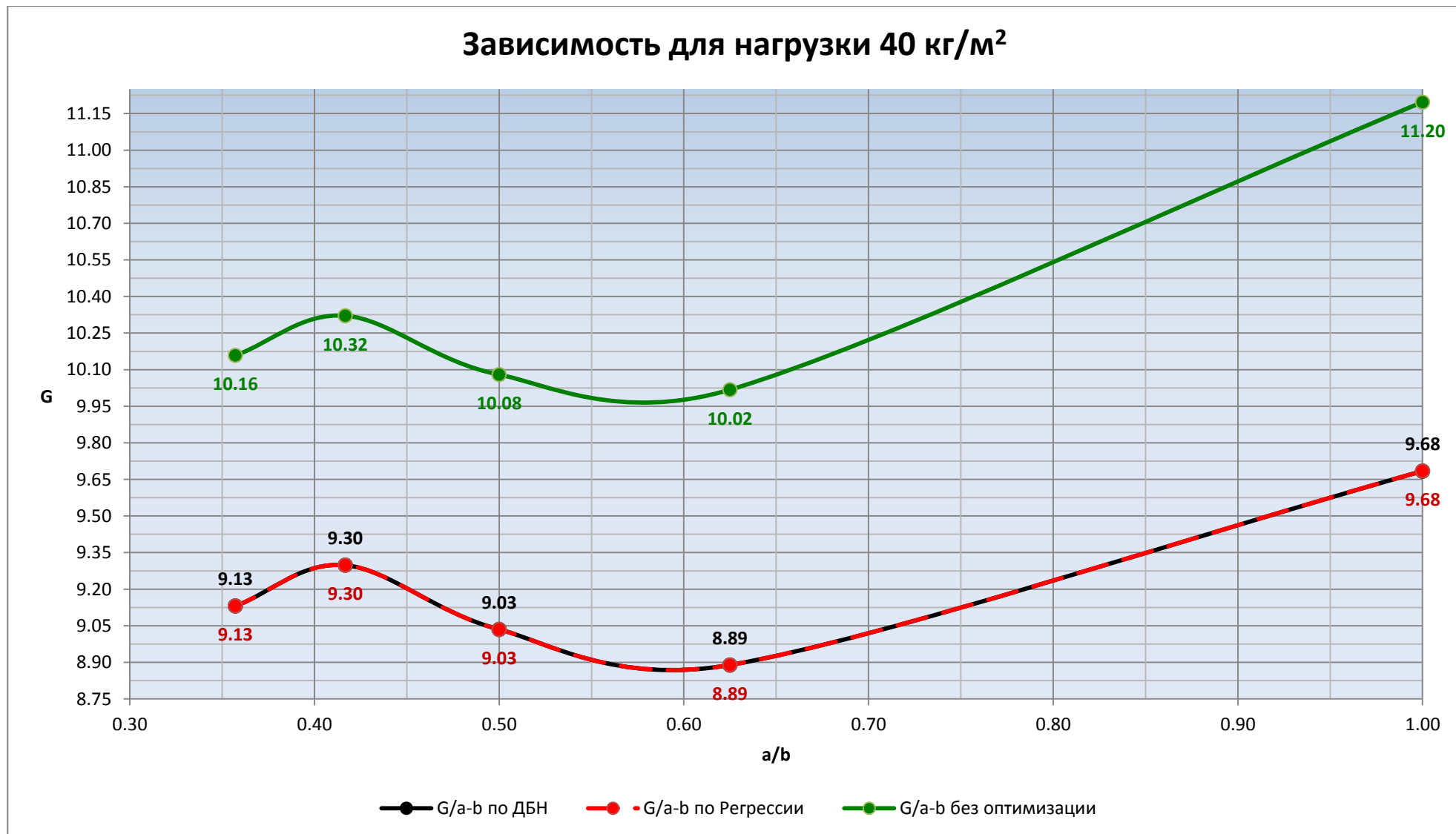


Рисунок Б.10 – Зависимость «Удельная масса конструкции – соотношение сторон в плане» при нагрузке 40 кг/м<sup>2</sup>

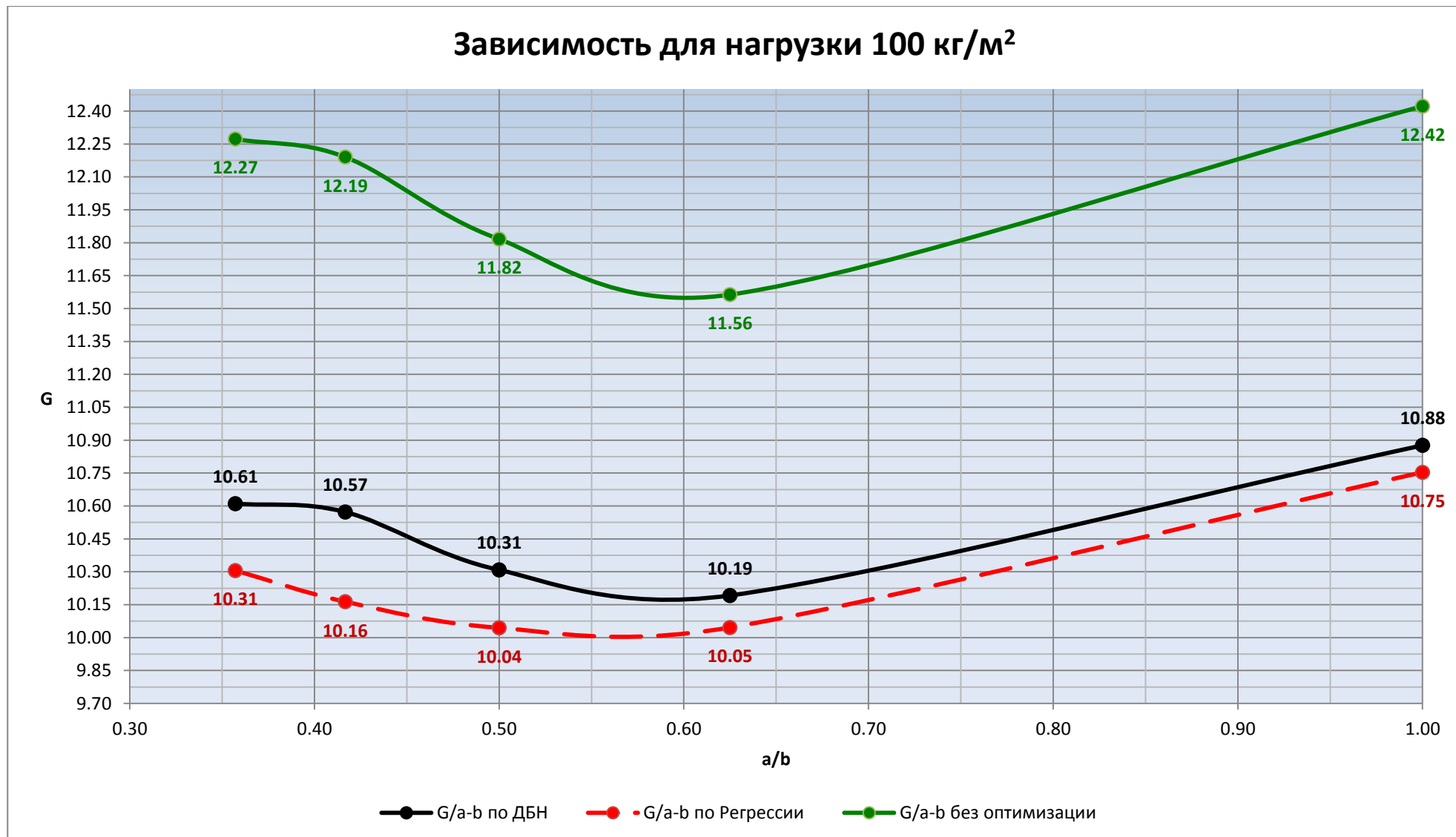


Рисунок Б.11 – Зависимость «Удельная масса конструкции – соотношение сторон в плане» 100 кг/м<sup>2</sup>

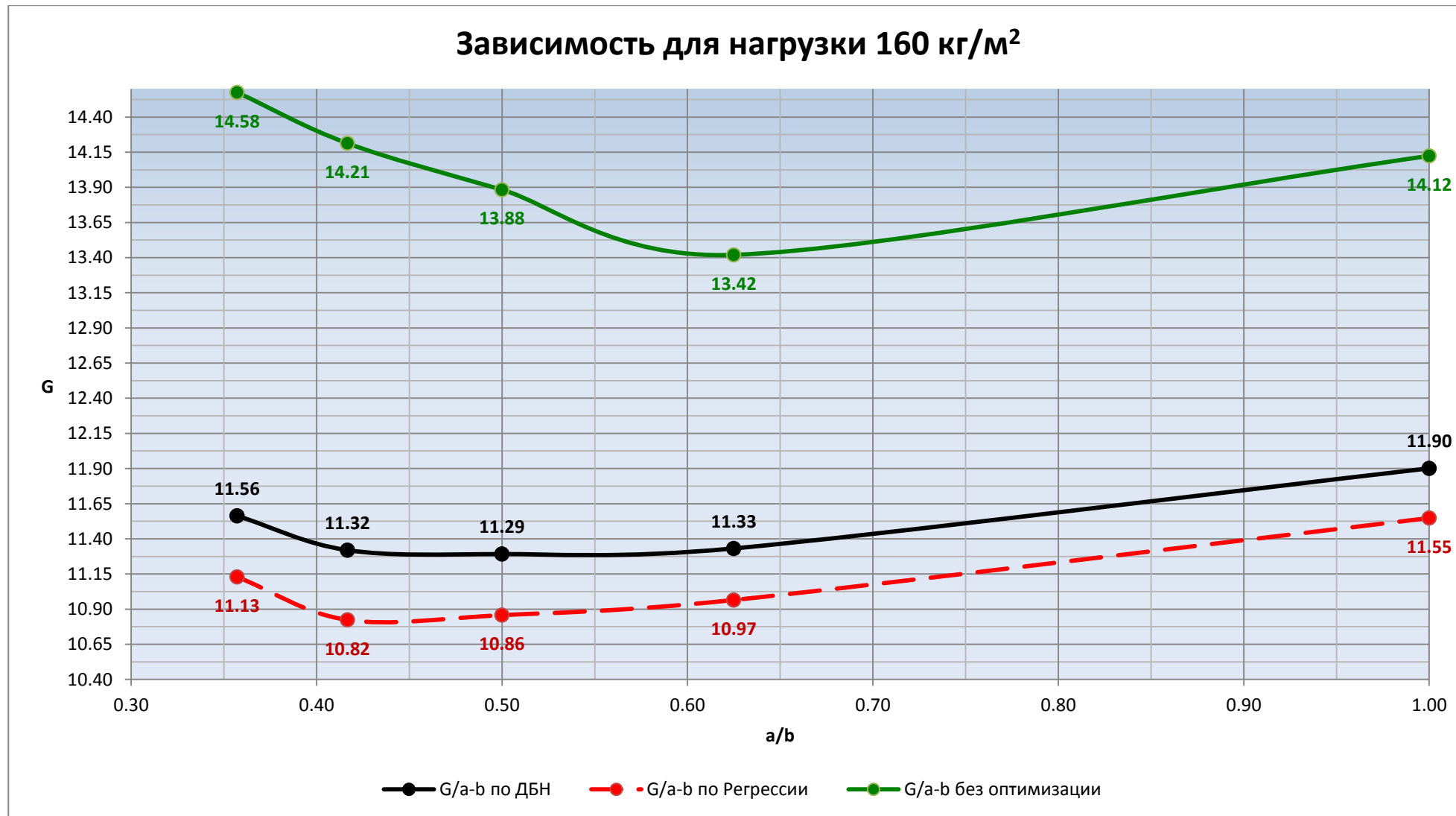


Рисунок Б.12– Зависимость «Удельная масса конструкции – соотношение сторон в плане» 160 кг/м<sup>2</sup>



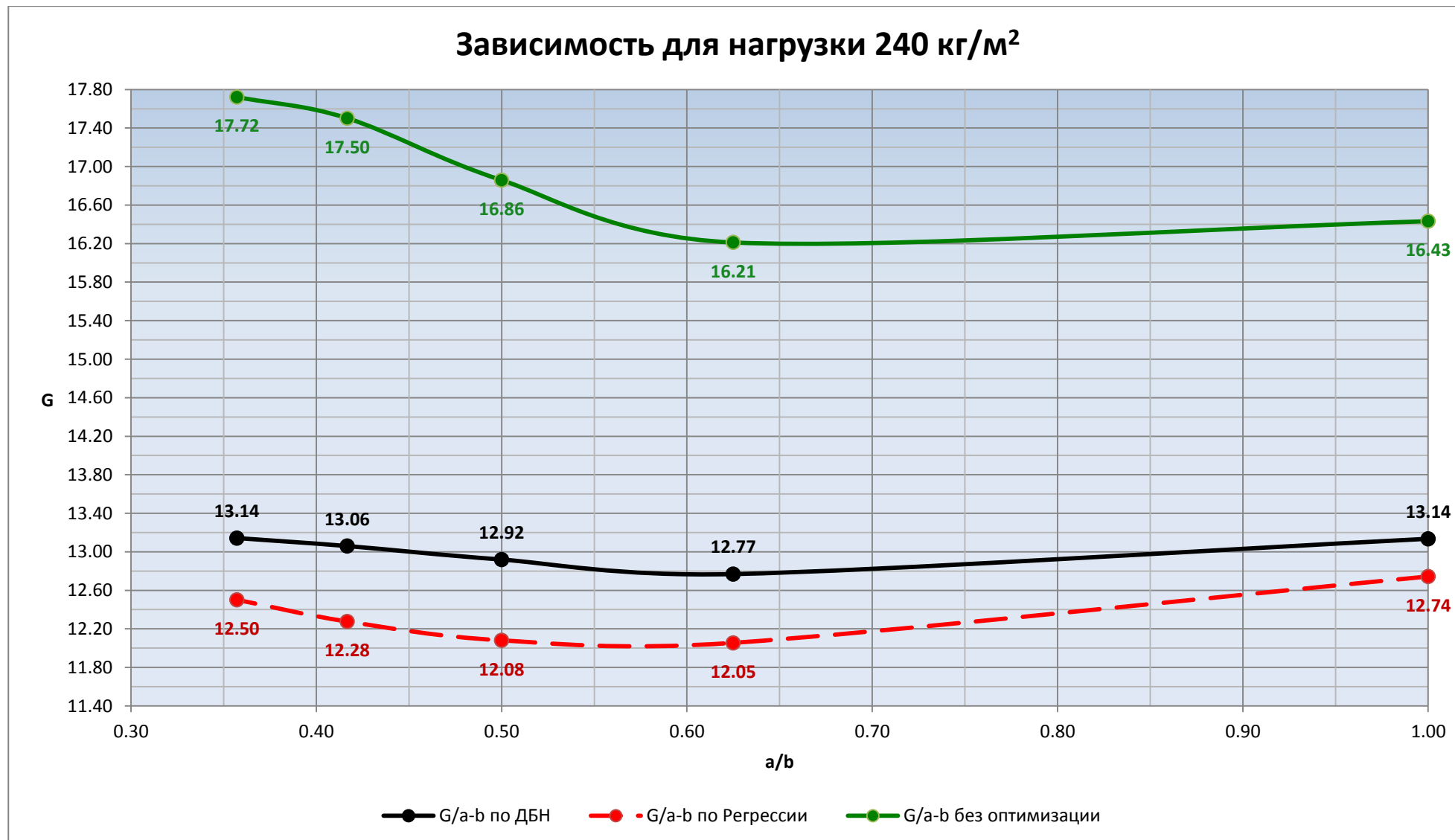


Рисунок Б.13 – Зависимость «Удельная масса конструкции – соотношение сторон в плане» 240 кг/м<sup>2</sup>

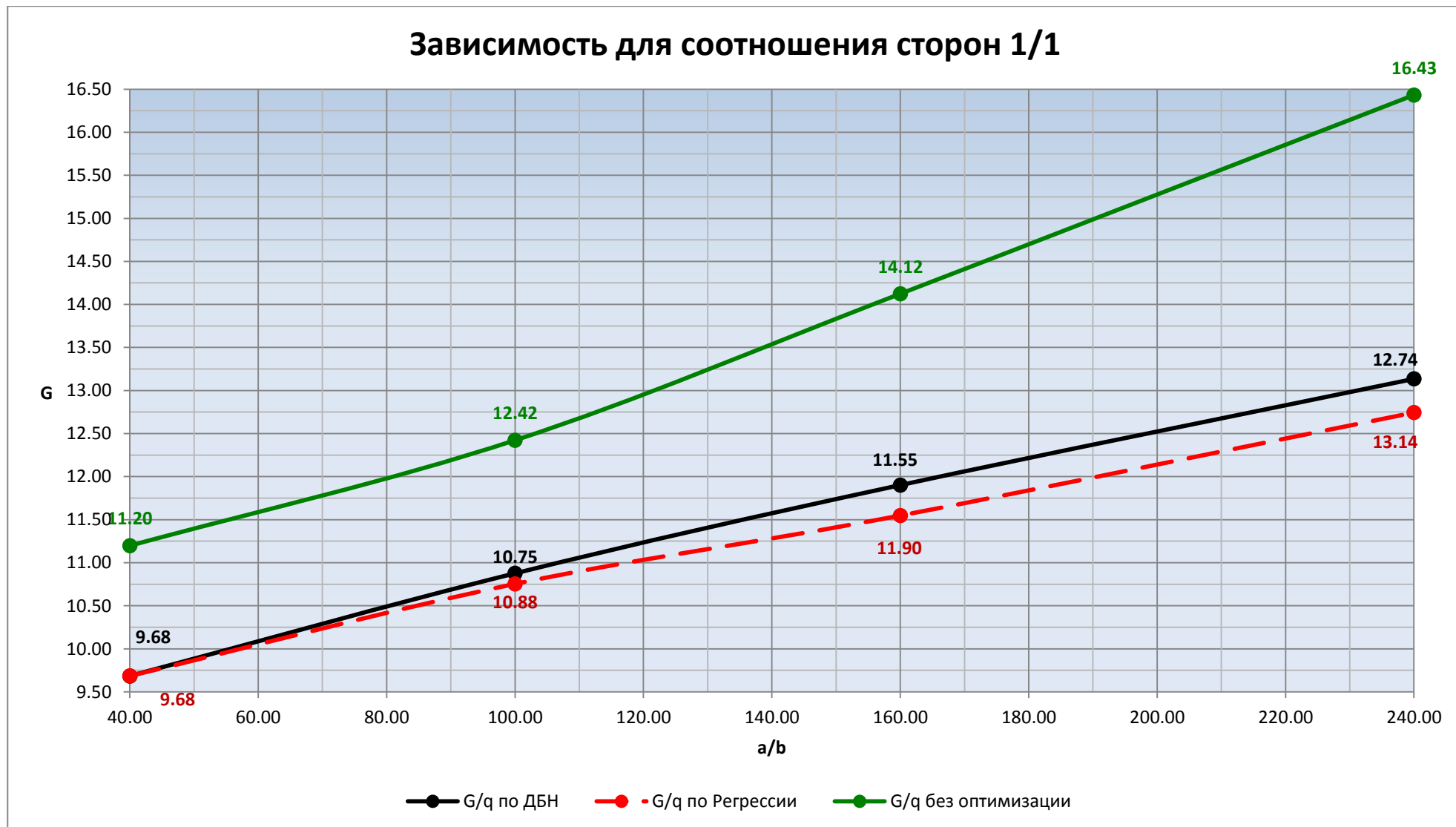


Рисунок Б.14 – Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» при соотношении сторон 1/1

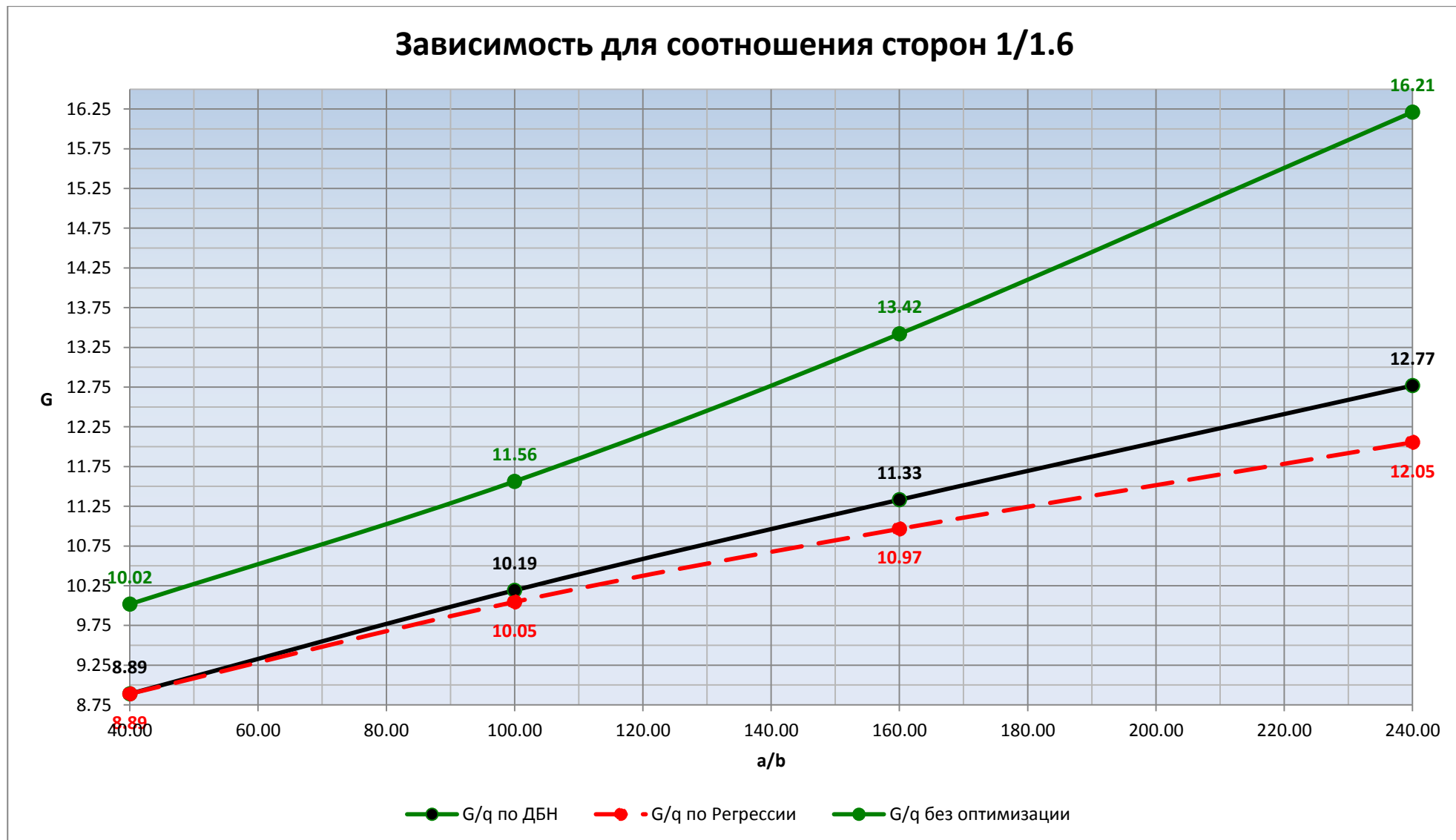


Рисунок Б.15– Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» при соотношении сторон 1/1.6

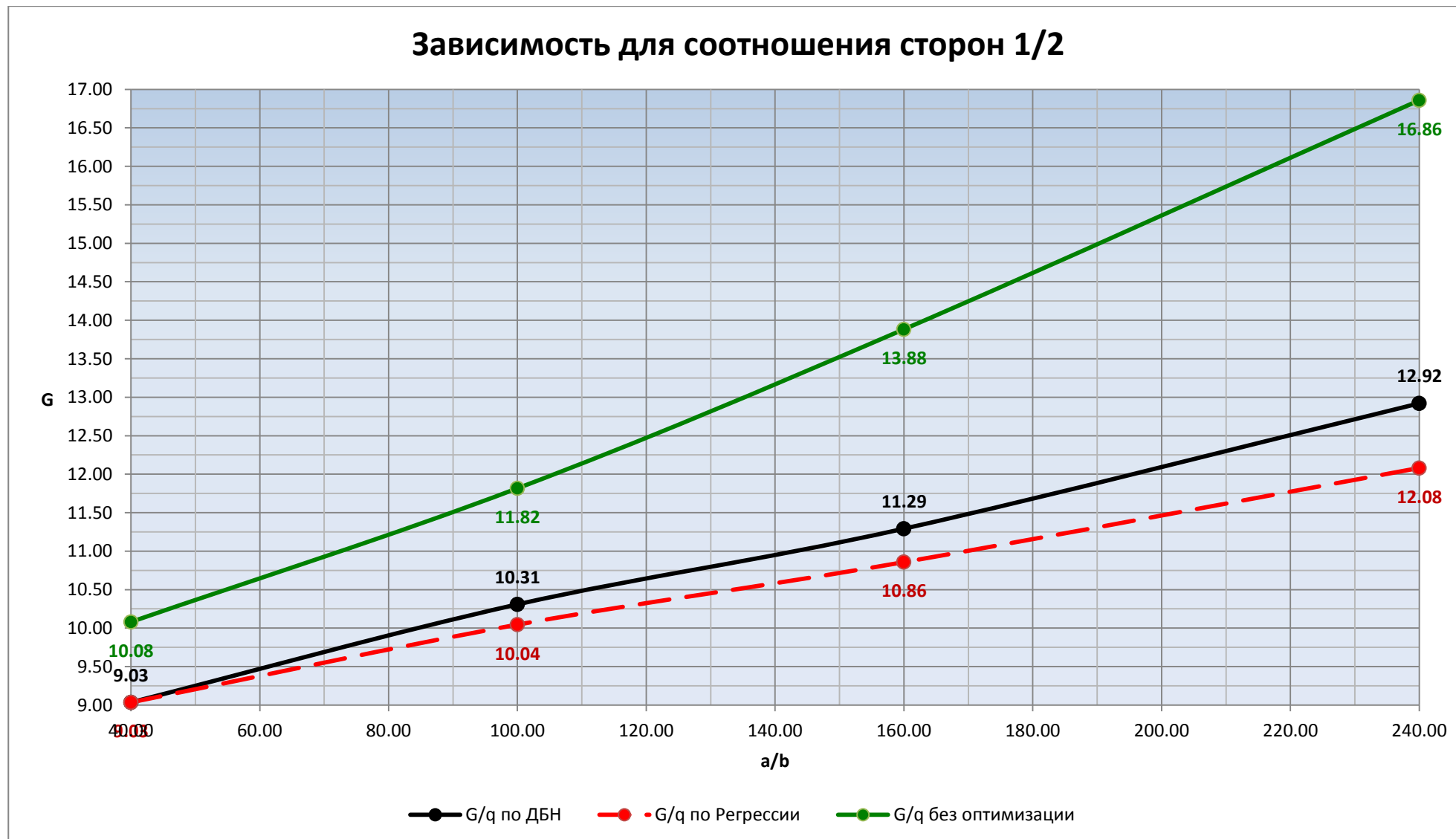


Рисунок Б.16– Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» при соотношении сторон 1/2

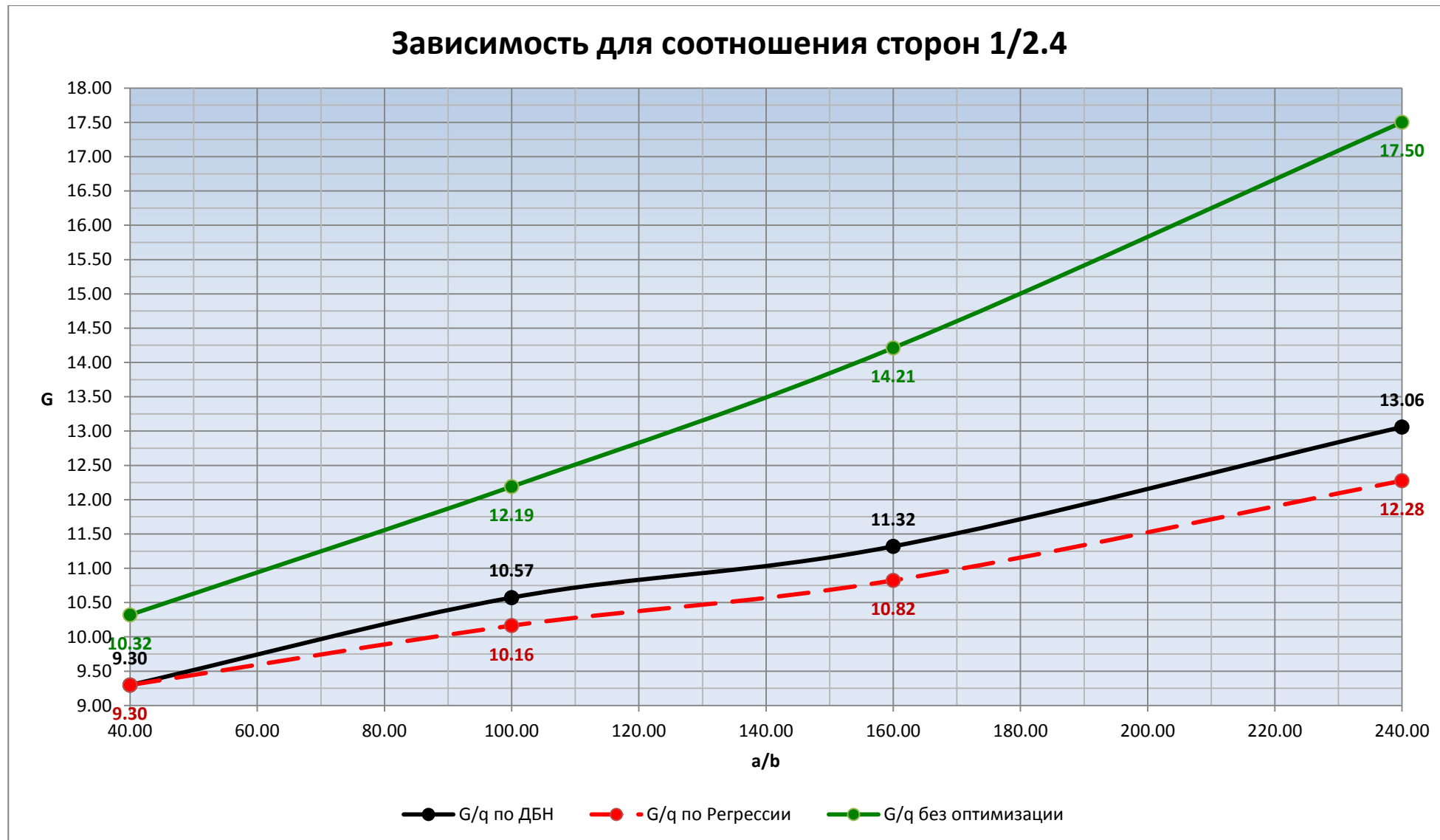


Рисунок Б.17 – Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» при соотношении сторон 1/2.4

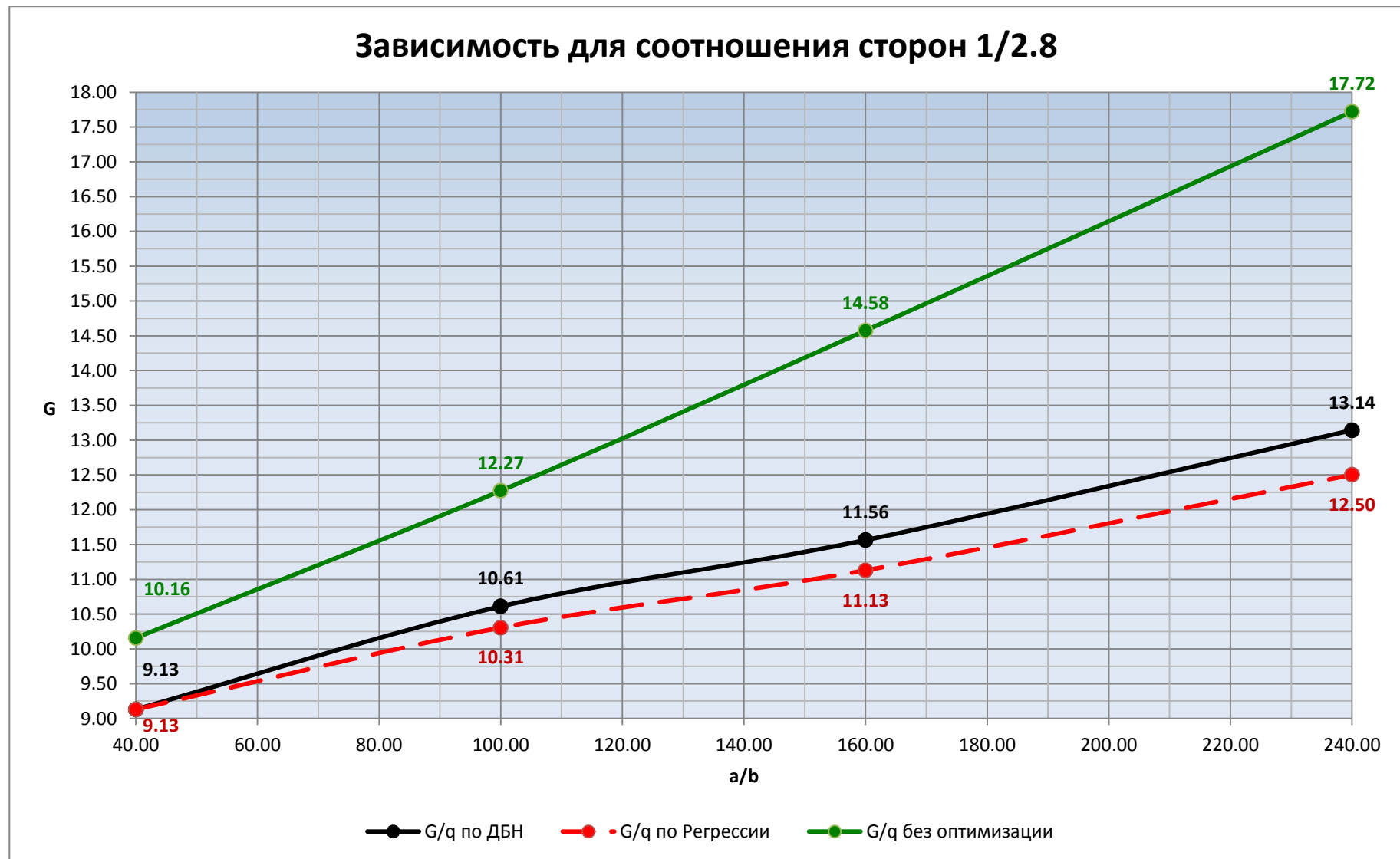


Рисунок Б.18– Зависимость «Удельная масса конструкции – нагрузка» при соотношении сторон 1/2.8

### Удельный вес покрытия (ДБН)

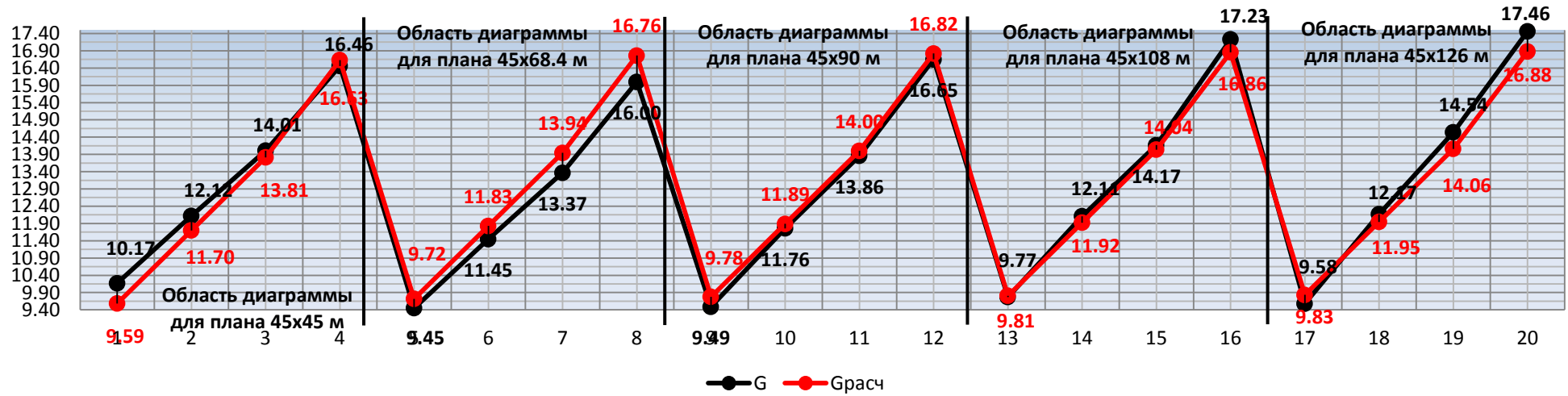


Рисунок Б.19 – Регрессионные зависимости результативного и расчетного показателя (по 1-му варианту)

### Удельный вес покрытия (Регрессия)

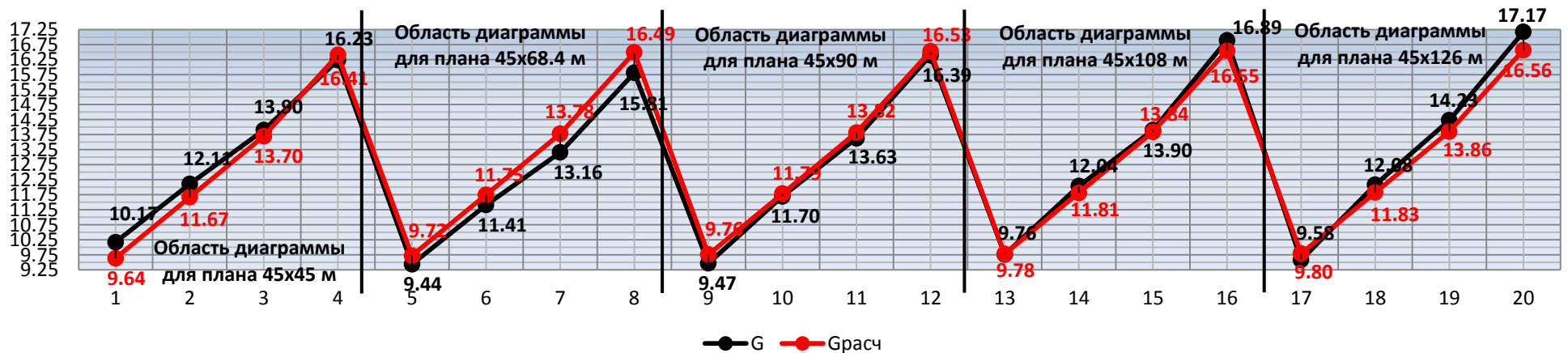


Рисунок Б.20 – Регрессионные зависимости результативного и расчетного показателя (по 1-му варианту)

### Относительная высота покрытия (ДБН)



Рисунок Б.21 – Регрессионные зависимости результативного и расчетного показателя (по 1-му варианту)

### Относительная высота покрытия (Регрессия)

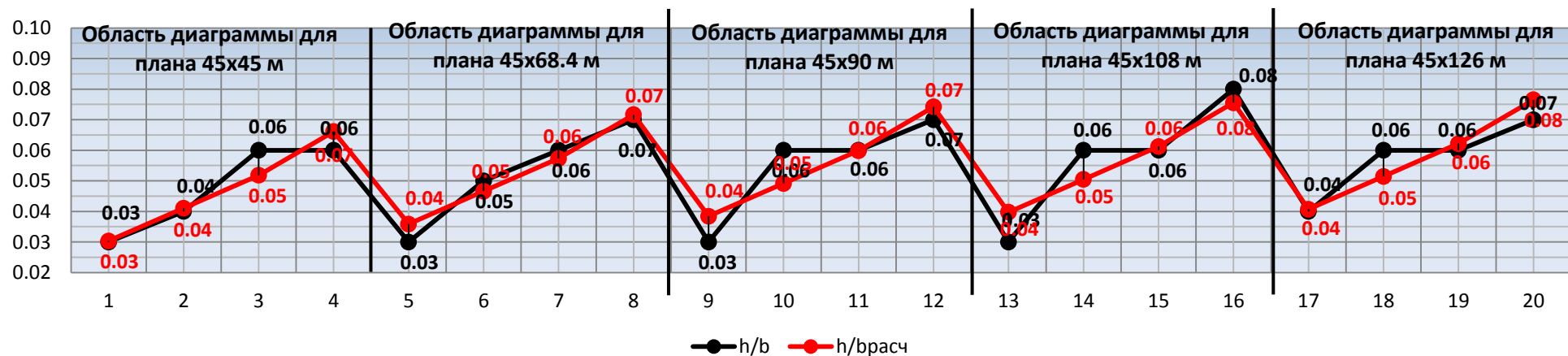


Рисунок Б.22 – Регрессионные зависимости результативного и расчетного показателя (по 1-му варианту)



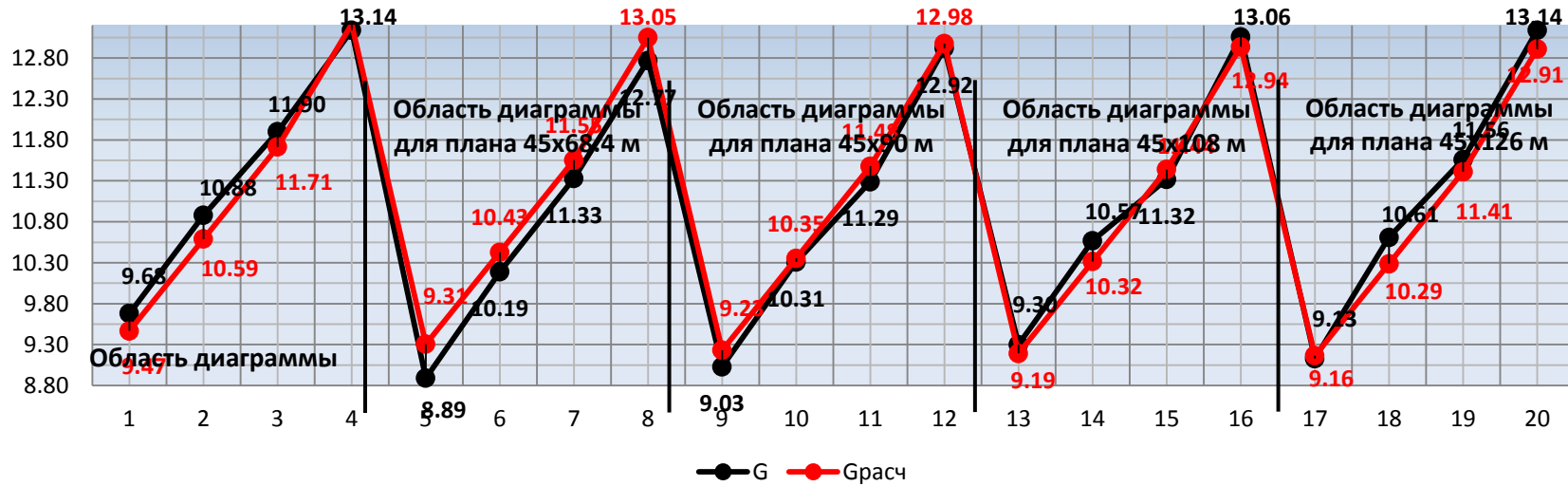


Рисунок Б.23 – Результаты регрессионного анализа по удельному весу покрытия (ДБН)



Рисунок Б.24 – Результаты регрессионного анализа по удельному весу покрытия (Регрессия)



Рисунок Б.25 – Результаты регрессионного анализа по соотношению стрелы к короткой стороне (ДБН)



Рисунок Б.26 – Результаты регрессионного анализа по соотношению стрелы к короткой стороне (Регрессия)

### Удельный вес покрытия (ДБН)

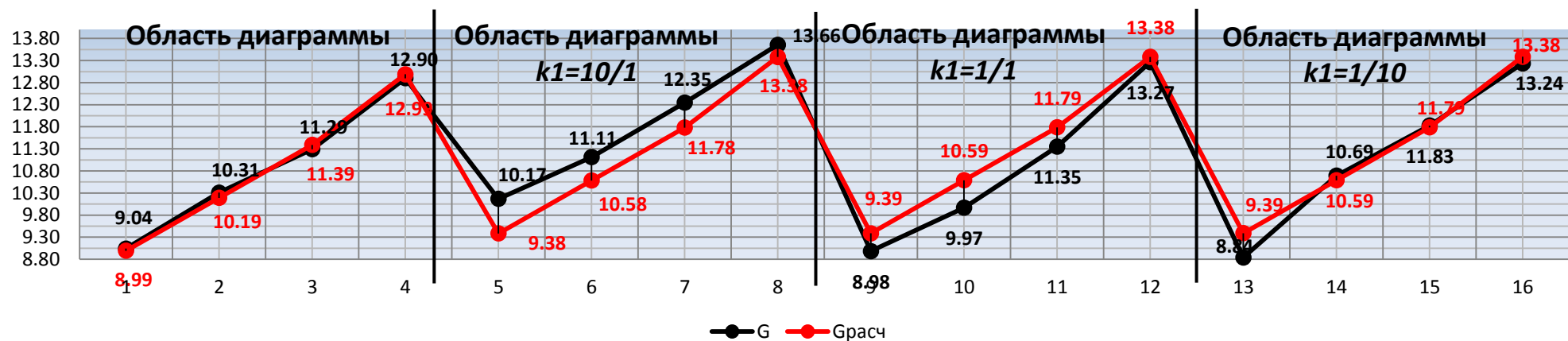


Рисунок Б.27 – Регрессионные зависимости результативного и расчетного показателя (G-ДБН)

### Удельный вес покрытия (Регрессия)

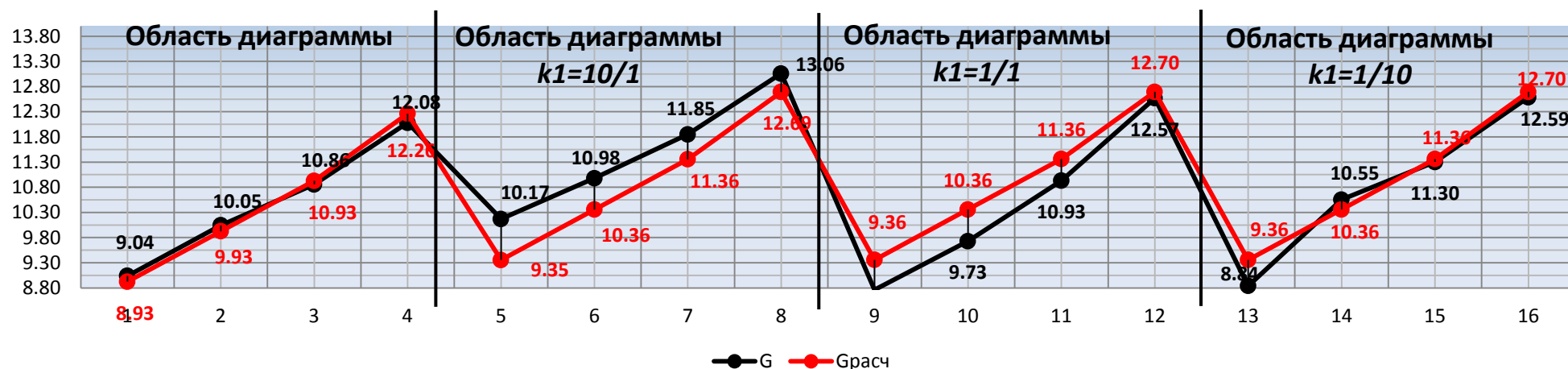


Рисунок Б.28 – Регрессионные зависимости результативного и расчетного показателя (G-регрессия)

### Относительная стрела выгиба (ДБН)

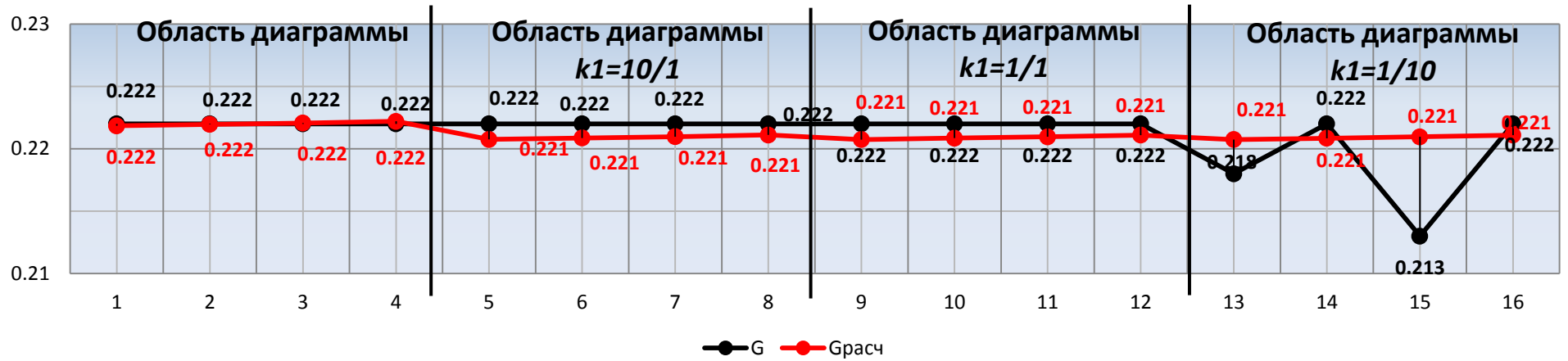


Рисунок Б.29 – Регрессионные зависимости результативного и расчетного показателя (f/b-ДБН)

### Относительная стрела выгиба (Регрессия)

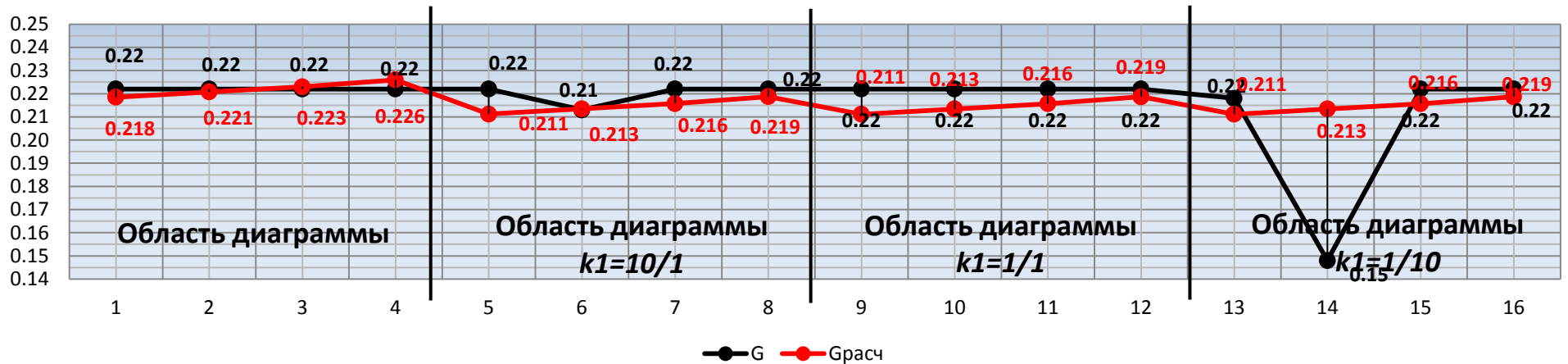


Рисунок Б.30 – Регрессионные зависимости результативного и расчетного показателя (f/b-Регрессия)

### Относительная высота покрытия (ДБН)

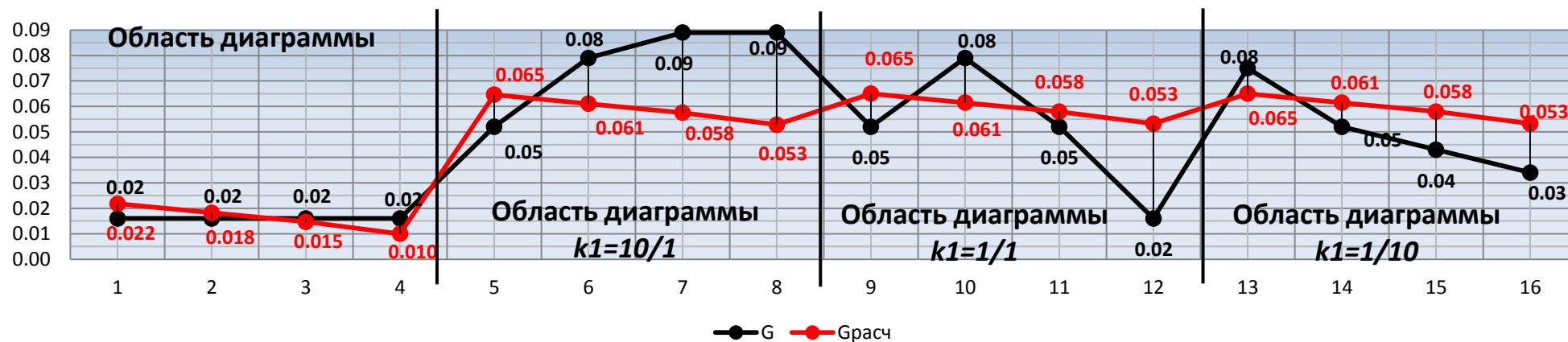


Рисунок Б.31 – Регрессионные зависимости результативного и расчетного показателя (h/b-ДБН)

### Относительная высота покрытия (Регрессия)

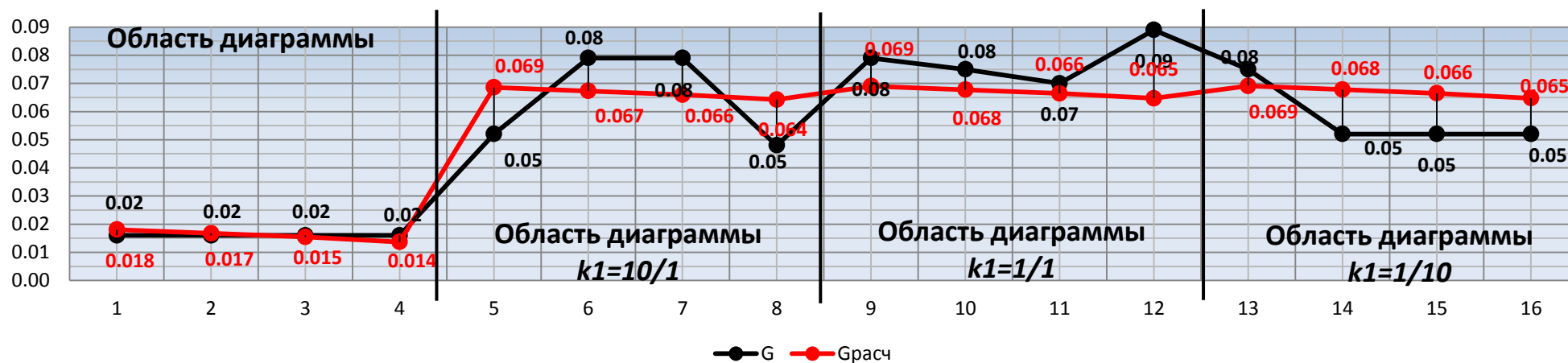


Рисунок Б.32 – Регрессионные зависимости результативного и расчетного показателя (h/b-Регрессия)

Таблица Б.1 – Массив данных для регрессионного анализа по  $G$  (один параметр)

| №п/п | План покрытия | Факторы |       | Результативный показатель по ДБН | Результативный показатель по предложенной методике |
|------|---------------|---------|-------|----------------------------------|--|
|      |               | $x_1$   | $x_2$ | $y$                              | $y$  |
| 1    | 2             | 3       | 4     | 5                                | 6  |
| 1    | 45x45         | 40.00   | 1.00  | 10.17                            | 10.17  |
| 2    | 45x45         | 100.00  | 1.00  | 12.12                            | 12.11  |
| 3    | 45x45         | 160.00  | 1.00  | 14.01                            | 13.90  |
| 4    | 45x45         | 240.00  | 1.00  | 16.46                            | 16.23  |
| 5    | 45x68.4       | 40.00   | 0.66  | 9.45                             | 9.44   |
| 6    | 45x68.4       | 100.00  | 0.66  | 11.45                            | 11.41  |
| 7    | 45x68.4       | 160.00  | 0.66  | 13.37                            | 13.16  |
| 8    | 45x68.4       | 240.00  | 0.66  | 16.00                            | 15.81  |
| 9    | 45x90         | 40.00   | 0.50  | 9.49                             | 9.47   |
| 10   | 45x90         | 100.00  | 0.50  | 11.76                            | 11.70  |
| 11   | 45x90         | 160.00  | 0.50  | 13.86                            | 13.63  |
| 12   | 45x90         | 240.00  | 0.50  | 16.65                            | 16.39  |
| 13   | 45x108        | 40.00   | 0.42  | 9.77                             | 9.76   |
| 14   | 45x108        | 100.00  | 0.42  | 12.11                            | 12.04  |
| 15   | 45x108        | 160.00  | 0.42  | 14.17                            | 13.90  |
| 16   | 45x108        | 240.00  | 0.42  | 17.23                            | 16.89  |
| 17   | 45x126        | 40.00   | 0.36  | 9.58                             | 9.58   |
| 18   | 45x126        | 100.00  | 0.36  | 12.17                            | 12.08  |
| 19   | 45x126        | 160.00  | 0.36  | 14.54                            | 14.23  |
| 20   | 45x126        | 240.00  | 0.36  | 17.46                            | 17.17  |

Таблица Б.2 – Массив данных для регрессионного анализа по  $h/b$  (один параметр)

| №п/п | План покрытия | Факторы |       | Результативный показатель по ДБН | Результативный показатель по предложенной методике |
|------|---------------|---------|-------|----------------------------------|--|
|      |               | $x_1$   | $x_2$ | $y$                              | $y$  |
| 1    | 2             | 3       | 4     | 5                                | 6  |
| 1    | 45x45         | 40.00   | 1.00  | 0.03                             | 0.03   |
| 2    | 45x45         | 100.00  | 1.00  | 0.05                             | 0.04   |
| 3    | 45x45         | 160.00  | 1.00  | 0.06                             | 0.06   |
| 4    | 45x45         | 240.00  | 1.00  | 0.06                             | 0.06   |
| 5    | 45x68.4       | 40.00   | 0.66  | 0.03                             | 0.03   |
| 6    | 45x68.4       | 100.00  | 0.66  | 0.05                             | 0.05   |
| 7    | 45x68.4       | 160.00  | 0.66  | 0.06                             | 0.06   |
| 8    | 45x68.4       | 240.00  | 0.66  | 0.07                             | 0.07   |
| 9    | 45x90         | 40.00   | 0.50  | 0.03                             | 0.03   |
| 10   | 45x90         | 100.00  | 0.50  | 0.06                             | 0.06   |
| 11   | 45x90         | 160.00  | 0.50  | 0.06                             | 0.06   |
| 12   | 45x90         | 240.00  | 0.50  | 0.07                             | 0.07   |
| 13   | 45x108        | 40.00   | 0.42  | 0.04                             | 0.03   |
| 14   | 45x108        | 100.00  | 0.42  | 0.06                             | 0.06   |
| 15   | 45x108        | 160.00  | 0.42  | 0.06                             | 0.06   |
| 16   | 45x108        | 240.00  | 0.42  | 0.08                             | 0.08   |

| №п/п | План покрытия | Факторы        |                | Результативный показатель по ДБН | Результативный показатель по предложенной методике |
|------|---------------|----------------|----------------|----------------------------------|--|
|      |               | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | y                                | y  |
| 1    | 2             | 3              | 4              | 5                                | 6  |
| 17   | 45x126        | 40.00          | 0.36           | 0.03                             | 0.04   |
| 18   | 45x126        | 100.00         | 0.36           | 0.06                             | 0.06   |
| 19   | 45x126        | 160.00         | 0.36           | 0.06                             | 0.06   |
| 20   | 45x126        | 240.00         | 0.36           | 0.08                             | 0.07   |

Таблица Б.3 – Массив данных для регрессионного анализа по  $G$  (два параметра)

| №п/п | План покрытия | Факторы        |                | Результативный показатель по ДБН | Результативный показатель по предложенной методике |
|------|---------------|----------------|----------------|----------------------------------|--|
|      |               | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | y                                | y  |
| 1    | 2             | 3              | 4              | 5                                | 6  |
| 1    | 45x45         | 40.00          | 1.00           | 9.68                             | 9.68   |
| 2    | 45x45         | 100.00         | 1.00           | 10.88                            | 10.75  |
| 3    | 45x45         | 160.00         | 1.00           | 11.90                            | 11.55  |
| 4    | 45x45         | 240.00         | 1.00           | 13.14                            | 12.74  |
| 5    | 45x68.4       | 40.00          | 0.66           | 8.89                             | 8.89   |
| 6    | 45x68.4       | 100.00         | 0.66           | 10.19                            | 10.05  |
| 7    | 45x68.4       | 160.00         | 0.66           | 11.33                            | 10.97  |
| 8    | 45x68.4       | 240.00         | 0.66           | 12.77                            | 12.05  |
| 9    | 45x90         | 40.00          | 0.50           | 9.03                             | 9.03   |
| 10   | 45x90         | 100.00         | 0.50           | 10.31                            | 10.04  |
| 11   | 45x90         | 160.00         | 0.50           | 11.29                            | 10.86  |
| 12   | 45x90         | 240.00         | 0.50           | 12.92                            | 12.08  |
| 13   | 45x108        | 40.00          | 0.42           | 9.30                             | 9.30   |
| 14   | 45x108        | 100.00         | 0.42           | 10.57                            | 10.16  |
| 15   | 45x108        | 160.00         | 0.42           | 11.32                            | 10.82  |
| 16   | 45x108        | 240.00         | 0.42           | 13.06                            | 12.28  |
| 17   | 45x126        | 40.00          | 0.36           | 9.13                             | 9.13   |
| 18   | 45x126        | 100.00         | 0.36           | 10.61                            | 10.31  |
| 19   | 45x126        | 160.00         | 0.36           | 11.56                            | 11.13  |
| 20   | 45x126        | 240.00         | 0.36           | 13.14                            | 12.50  |

Таблица Б.4 – Массив данных для регрессионного анализа по  $f/b$  (два параметра)

| №п/п | План покрытия | Факторы        |                | Результативный показатель по ДБН | Результативный показатель по предложенной методике |
|------|---------------|----------------|----------------|----------------------------------|--|
|      |               | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | y                                | y  |
| 1    | 2             | 3              | 4              | 5                                | 6  |
| 1    | 45x45         | 40.00          | 1.00           | 0.17                             |  |
| 2    | 45x45         | 100.00         | 1.00           | 0.22                             |  |
| 3    | 45x45         | 160.00         | 1.00           | 0.22                             |  |
| 4    | 45x45         | 240.00         | 1.00           | 0.21                             |  |
| 5    | 45x68.4       | 40.00          | 0.66           | 0.22                             |  |

| №п/п | План покрытия | Факторы        |                | Результативный показатель по ДБН | Результативный показатель по предложенной методике |
|------|---------------|----------------|----------------|----------------------------------|--|
|      |               | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | y                                | y  |
| 1    | 2             | 3              | 4              | 5                                | 6  |
| 6    | 45x68.4       | 100.00         | 0.66           | 0.22                             | 0.17   |
| 7    | 45x68.4       | 160.00         | 0.66           | 0.22                             | 0.19   |
| 8    | 45x68.4       | 240.00         | 0.66           | 0.22                             | 0.19   |
| 9    | 45x90         | 40.00          | 0.50           | 0.22                             | 0.22   |
| 10   | 45x90         | 100.00         | 0.50           | 0.22                             | 0.22   |
| 11   | 45x90         | 160.00         | 0.50           | 0.22                             | 0.22   |
| 12   | 45x90         | 240.00         | 0.50           | 0.22                             | 0.22   |
| 13   | 45x108        | 40.00          | 0.42           | 0.22                             | 0.22   |
| 14   | 45x108        | 100.00         | 0.42           | 0.22                             | 0.22   |
| 15   | 45x108        | 160.00         | 0.42           | 0.22                             | 0.22   |
| 16   | 45x108        | 240.00         | 0.42           | 0.22                             | 0.22   |
| 17   | 45x126        | 40.00          | 0.36           | 0.22                             | 0.22   |
| 18   | 45x126        | 100.00         | 0.36           | 0.22                             | 0.22   |
| 19   | 45x126        | 160.00         | 0.36           | 0.22                             | 0.22   |
| 20   | 45x126        | 240.00         | 0.36           | 0.22                             | 0.22   |



## **ПРИЛОЖЕНИЕ В**

**(рекомендации по проектированию структурных конструкций с шаровыми узловыми вставками-коннекторами на высокопрочных болтах)**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального  
образования

«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

А.В. Мущанов, Е.В. Горохов, В.Ф. Мущанов, И.В. Роменский,  
А.Н. Оржиховский

## Рекомендации

ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ С ШАРОВЫМИ  
УЗЛОВЫМИ ВСТАВКАМИ-КОННЕКТОРАМИ НА ВЫСОКОПРОЧНЫХ  
БОЛТАХ

УДК 624.02:624.078.46.001.63(076)

ББК 38.44-22Я7

М 93

Рекомендовано к изданию советом строительного факультета Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» от 18.06.2020, протокол № 10

Рецензент

А.Н. Миронов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлические конструкции и сооружения», ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**М93 «Рекомендации по проектированию структурных покрытий с шаровыми узловыми вставками-коннекторами на высокопрочных болтах» / А.В. Мущанов. – Макеевка ГОУ ВПО «ДОННАСА»2020. – 22 с.**

В настоящих рекомендациях приведены положения по расчету, проектированию и конструированию структурных конструкций с шаровыми узловыми вставками-коннекторами на высокопрочных болтах. Приведены основные сведения по выбору материалов

Рекомендации предназначены для инженерно-технических работников проектных строительных и научно-исследовательских организаций, преподавателей и студентов высших учебных заведений строительного профиля, магистров аспирантов.

УДК 624.014.001.63:004.42(076)

ББК 38.54-022+32.273.26-018.2Я7

© А.В. Мущанов, 2020

© ГОУ ВПО «ДОННАСА», 2020

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

|  |     |
|--|-----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ.....   | 173 |
| 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....   | 174 |
| 2. МАТЕРИАЛЫ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ КОНСТРУКЦИЙ.....   | 174 |
| 3. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ<br>СТРУКТУРНОГО ПОКРЫТИЯ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ<br>ПРОЕКТИРОВАНИЯ..... | 175 |
| 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ.....  | 177 |
| 4.1. Аналитические и приближенные методы.....  | 177 |
| 4.2. Численные методы.....   | 177 |
| 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ.....  | 178 |
| 6. ЛИТЕРАТУРА.....   | 179 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ: ПРИМЕР РАСЧЕТА.....  | 180 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

При проектировании большепролетных покрытий основополагающим фактором является минимизация удельной металлоемкости конструкции при сохранении её надежной эксплуатации. Такому требованию в достаточной степени удовлетворяют структурные конструкции (Рисунок 1.1 а, б), для которых:

- за счет пространственной работы элементов ячейки структурной конструкции достигается перераспределение напряжений, и как следствие, назначение значительно меньшего сечения центрально-сжатым и растянутым элементам;
- в связи с многосвязностью системы, при отказе в работе стержня конструкции, происходит перераспределение напряжений без перехода системы в аварийное состояние.

Наиболее эффективными в работе и экономичными вариантами покрытия характеризуются:

- квадратная либо прямоугольная (соотношением сторон не более 1:2) форма покрытия в плане
- замкнутый опорный контур, обеспечивающий наиболее выгодные условия работы.

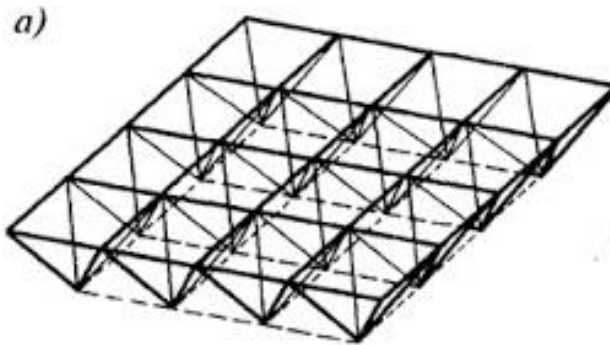


Рисунок 1.1 а – Схематичное представление структурной конструкции

Рисунок 1.1 б – Натурный вид структурной конструкции

В Рекомендациях изложены расчетные положения и разработанные принципы оптимального проектирования вышеуказанных конструкций. Приведены примеры расчета, даны рекомендации по назначению оптимальных параметров покрытия, полученных на основе разработанного алгоритма

оптимизации конструкции и последующего регрессионного анализа полученных данных.

## **1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

1.1. Основные элементы проектируемого покрытия – центрально-сжатые и растянутые стержни, выполненные из прокатных труб круглого сечения, которые закрепляются в соединительном элементе (вставка-коннектор) при помощи высокопрочных болтов через металлическую заглушку [6].

1.2. Выбор материала, основных геометрических и жесткостных параметров проектируемой структурной конструкции следует осуществлять согласно требований нормативных документов [1, 2, 3], на основе технико-экономического сравнения вариантов [4, 5] или оптимального проектирования [7].

1.3. Разработанные проектные решения должны обеспечивать прочность, жесткость и устойчивость как всей конструкции, так и отдельных элементов и соединений на этапах изготовления, монтажа и эксплуатации.

1.4. Конструктивные решения структурного покрытия должны быть обоснованы на стадии проектирования с учетом требований обеспечения коррозионной стойкости, долговечности и ремонтпригодности в процессе эксплуатации конструкции. Выбор материалов для гидро-, теплоизоляции и противокоррозионной защиты производится на основе действующих нормативных положений [1,2].

1.5. Контроль технического состояния структурного покрытия, оценка показателей несущей способности и разработка рекомендаций по усилению, восстановлению проектных показателей качества и долговечности, дальнейшей эксплуатации производится на основе действующих нормативных положений [1,2].

## **2. МАТЕРИАЛЫ, ТРЕБОВАНИЯ К ИЗГОТОВЛЕНИЮ КОНСТРУКЦИЙ**

2.1. При выборе материалов для несущих и ограждающих конструкций для структурных покрытий необходимо удовлетворить требованиям снижения металлоемкости, обеспечения надежности и долговечности конструкции. Выбор материалов осуществляется на основе учета характеристик коррозионной стойкости, степени агрессивности воздействий, тепло- и гидроизоляционных свойств, характеристик огнестойкости и пожароопасности.

2.2. Для изготовления элементов структурной конструкции принимать следующие материалы:

2.2.1. Центрально-сжатые и центрально-растянутые стержни покрытия принимать толщиной проката 3...12 мм:

– Малоуглеродистая сталь С235-С255 по ГОСТ 27772-88 (Ст3 по ГОСТ 380-2005);

– Низколегированная сталь С345 по ГОСТ 27772-88 (09Г2С по ГОСТ 19281-2014);

2.2.2. Заглушки для прокатных труб принимать сечением 1,2R стержня; вставки-коннекторы:

– Углеродистая качественная Сталь 20 по ГОСТ 2590-2006;

– Углеродистая качественная Сталь 40 по ГОСТ 1050-2013;

2.2.3. Болтовые соединения принимать класса прочности не ниже 8.8:

– 40Х, 40Х «селект» по ГОСТ 22353-77.

### 3. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНОГО ПОКРЫТИЯ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

3.1. Выбор эффективных конструктивных решений на начальной стадии проектирования определяется оптимальным значением основных параметров конструкции – удельной массы покрытия ( $G$ ) и оптимальной высотой покрытия ( $h/b$ ). Назначить такие оптимальные параметры предлагается, опираясь на задаваемое очертание проектируемого покрытия – плоское либо криволинейное. Подбор сечений центрально-сжатых и центрально-растянутых стержней осуществлять по нормативным документам [1] или по формуле, указанной в пункте 4.1.

3.2. Удельная масса покрытия и относительная высота покрытия определяется по формулам (3.1) и (3.2):

$$G = b_0 + b_1 q_p \pm b_2 \frac{a}{b} \quad (3.1)$$

$$\frac{h}{b} = b_0 + b_1 q_p \pm b_2 \frac{a}{b} \quad (3.2)$$

где  $G$  – удельная масса структурного покрытия;

$h/b$  – относительная высота структурного покрытия;

$b_0, b_1, b_2$  – коэффициенты, полученные в результате регрессионного анализа;

$q_p$  – расчетная нагрузка на  $1\text{ м}^2$  структурного покрытия;

$a/b$  – соотношение сторон структурного покрытия в плане.

3.2.1. Удельная масса и относительная высота покрытия для плоского покрытия с подбором сечений по действующим нормативным документам [1,2] определяются по таблице 3.1:

Таблица 3.1 – Определение параметров для плоского покрытия

| № п/п | Формула                                   | Описание                             |
|-------|---|--------------------------------------|
| 1     | $G_{расч} = 8,56004 + 0,03523 * q_{расч}$ | Определение удельной массы покрытия, |

|   |  |   |
|---|--|---|
|   | $0.38389*a/b$                                    | оптимизированной по одному параметру (относительная высота покрытия) с подбором центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам  |
| 2 | $h/b_{расч}=0,03809+0,00019*q_{расч}-0.0138*a/b$ | Определение оптимальной относительной высоты покрытия, оптимизированной по одному параметру (относительная высота покрытия) с подбором центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам |

3.2.2. Удельная масса и относительная высота покрытия для плоского покрытия с подбором сечений по 4.1 определяются по таблице 3.2:

Таблица 3.2 – Определение параметров для плоского покрытия

| № п/п | Формула   | Описание  |
|-------|---|---|
| 1     | $G_{расч}=8,52905+0,03384*q_{расч}-0.2448*a/b$  | Определение удельной массы покрытия, оптимизированной по одному параметру (относительная высота покрытия) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором                   |
| 2     | $h/b_{расч}=0,0393+0,00018*q_{расч}-0.0161*a/b$ | Определение оптимальной относительной высоты покрытия, оптимизированной по одному параметру (относительная высота покрытия) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором |

3.2.3. Удельная масса и относительная высота покрытия для криволинейного покрытия с подбором сечений по действующим нормативным документам [1,2] определяются по таблице 3.3:

Таблица 3.3 – Определение параметров для криволинейного покрытия

| № п/п | Формула   | Описание   |
|-------|---|--|
| 1     | $G_{расч}=8,24686+0,01873*q_{расч}+0,47052*a/b$     | Определение удельной массы покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и относительная стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором                   |
| 2     | $f/b_{расч}=0,22617+0,0000034*q_{расч}-0,0234*a/b*$ | Определение оптимальной относительной высоты покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и относительная стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором |



3.2.4. Удельная масса и относительная высота покрытия для криволинейного покрытия с подбором сечений по формуле 4.1 по таблице 3.4:

Таблица 3.4 – Определение параметров для криволинейного покрытия

| № п/п | Формула  | Описание   |
|-------|--|--|
| 1     | $G_{расч}=8,20306+0,01541*q_{расч}+0,73692*a/b$      | Определение удельной массы покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и относительная стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором                   |
| 2     | $f/b_{расч}=0,233344+0,0000046*q_{расч}-0,0429*a/b*$ | Определение оптимальной относительной высоты покрытия, оптимизированной по двум параметрам (относительная высота покрытия и относительная стрела выгиба) с подбором центрально-сжатых стержней по уточненной методике, разработанной автором |

\* - для криволинейного покрытия относительная высота назначается минимально возможной, исходя из минимально возможного угла наклона стержней решетки к поясам, и приблизительно равной  $b/64$ .

3.2.5 Для определения оптимальных параметров структурного покрытия, задаваемых на начальной стадии проектирования, рекомендуется использовать специализированный программный комплекс по расчету и оптимальному проектированию структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах, разработанный на кафедре «Теоретическая и прикладная механика» ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» [7].

#### 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ

4.1. Расчет структурных покрытий производится в соответствии с нормативными документами [1,2], а также данных Рекомендаций.

Расчетная схема для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) стержней структурного покрытия необходимо принимать, как шарнирно-стержневую.

Предельное состояние элементов структурного покрытия регламентируется в соответствии с [1,2] первой группой предельных состояний.

4.2. Аналитические методы расчета.

4.2.1. Возможность использования аналитических методов расчета обусловлена на первой стадии рабочего проектирования. Для определения НДС покрытия возможно использование метода представления покрытия, как единой

плиты эквивалентной толщины на заданном опорном контуре для нахождения максимальных изгибающих моментов в двух плоскостях [3].

4.2.2. При подборе сечений на расчетные нагрузки для стержней покрытия рекомендуется использовать следующие варианты:

- Подбор сечений центрально-сжатых и растянутых стержней согласно действующим нормативным документам [1,2];
- Подбор сечений центрально-сжатых и растянутых стержней с учетом влияния конструктивного решения узлов на несущую способность из условия устойчивости [4,5]:

$$y = 20,201 - 1,062x_1 + 8,7019x_2, \quad (4.1)$$

где  $x_1$  – значение условной гибкости ( $\bar{\lambda}$ ), определяется по [1], п. 4.2;

$x_2$  – отношение длины закрепленного участка (точка условного центра шаровой вставки-коннектора) к половине проектной длины стержня;

#### 4.3. Численные методы расчета.

4.3.1. Численные методы служат для окончательного расчета покрытий на стадии рабочего проектирования, что обусловлено их возможностью наиболее полно и корректно учитывать реальные условия закрепления, распределение напряжений в конструкции и унификацию при подборе сечений элементов.

4.3.2. Численные расчеты структурных покрытий рекомендуется проводить в расчетных комплексах, в основу которых заложен метод конечных элементов (МКЭ). Моделирование покрытия в упрощенном виде рекомендуется выполнять по шарнирно-стержневой схеме стержневыми конечными элементами с приложением нагрузки в узлы верхнего пояса структурной конструкции.

## 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ

5.1. В данных рекомендациях рассматриваются структурные конструкции с узловыми соединениями, в состав которых входят следующие компоненты (Рисунок 5.1):



Рисунок 5.1 – Узел структурной конструкции: 1 – шаровая вставка коннектор; 2 – высокопрочный болт; 3 – заглушка; 4 – стержень

5.2. В таблице 5.1 указаны рекомендуемые сечения для назначения стержневых элементов из прокатной трубы:

Таблица 5.1 – Рекомендуемые сечения стержней

| № п/п | Сечение  | Нормативный документ |
|-------|----------|----------------------|
| 1     | 2        | 3                    |
| 1     | Ø48x3    | ГОСТ 10704-91        |
| 2     | Ø60x3.2  | ГОСТ 10704-91        |
| 3     | Ø76x3.2  | ГОСТ 10704-91        |
| 4     | Ø89x3.5  | ГОСТ 10704-91        |
| 5     | Ø102x3.5 | ГОСТ 10704-91        |
| 6     | Ø114x4   | ГОСТ 10704-91        |
| 7     | Ø127x4.5 | ГОСТ 10704-91        |
| 8     | Ø127x6   | ГОСТ 8732-78         |
| 9     | Ø133x8   | ГОСТ 8732-78         |
| 10    | Ø146x10  | ГОСТ 8732-78         |
| 11    | Ø159x12  | ГОСТ 8732-78         |

Таблица 5.2 – Рекомендуемые сечения узловых компонентов

| № п/п | Сечение  | Маркировка болта | Сечение коннектора | Сечение заглушки |
|-------|----------|------------------|--------------------|------------------|
| 1     | 2        | 3                | 4                  | 5                |
| 1     | Ø48x3    | M22              | 120x120            | Ø48x20           |
| 2     | Ø60x3.2  | M22              | 120x120            | Ø60x20           |
| 3     | Ø76x3.2  | M22              | 120x120            | Ø76x30           |
| 4     | Ø89x3.5  | M22              | 120x120            | Ø89x30           |
| 5     | Ø102x3.5 | M30              | 150x150            | Ø102x50          |
| 6     | Ø114x4   | M30              | 150x150            | Ø114x50          |
| 7     | Ø127x4.5 | M36              | 170x170            | Ø127x50          |
| 8     | Ø127x6   | M36              | 170x170            | Ø127x50          |
| 9     | Ø133x8   | M48              | 200x200            | Ø133x60          |
| 10    | Ø146x10  | M48              | 200x200            | Ø146x60          |
| 11    | Ø159x12  | M48              | 200x200            | Ø159x60          |

5.3. В таблице 5.2 указаны рекомендуемые сечения для назначения компонентов узловых соединений:

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.6-198:2014. Стальные конструкции. Нормы проектирования. [Текст]. – Введ. 2015-01-01. К.:Мінбуд України, 2014. – 198 с.
2. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования [Текст]. – Введ. 2017-07-08. М.: Росстандарт, 2017. – 158 с.
3. Рекомендации по проектированию структурных конструкций / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР [Текст]. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.
4. Горохов Е.В., Танасогло А.В., Муцанов А.В. Оценка устойчивости центрально-сжатых стержней структурных покрытий с учётом конструктивных особенностей узловых соединений и нелинейной работы материала // УАМК Металлические конструкции 2018, ТОМ 24, НОМЕР 3, С.105-121. ISSN 1993-3517 online.
5. Муцанов А.В. Оптимальные конструктивные решения структурных покрытий на прямоугольных нетиповых планах // Металлические конструкции 2020, ТОМ 26, НОМЕР 1, 37-48. ISSN 1993-3517 online.
6. Система MAPXI [Electronicresource] // Виктория Научно-проектный центр. – URL: <http://www.sistems-marhi.ru> (дата обращения: 04.09.2020)
7. Муцанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Муцанов А.В. Оптимальное проектирование структурных покрытий на нетиповых планах // Международная научно-практическая конференция, посвященная 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИННОВАЦИИ (XXIII научные чтения) (с. 75), 2019.

### Пример расчета

Исходные данные:

1. Структурное покрытие (плоской геометрии);
2. Размеры в плане – 68.4x45 м;
3. Высота ячейки – 2,74 м.
4. Сечения и материал стержней – трубы горячекатаные из малоуглеродистой стали С245.
5. Сечения коннекторов – стальные шары из углеродистой качественной Стали 4.
6. Высокопрочные болты из стали 40Х «селект».
7. Нагрузка на покрытие – 240 кг/м<sup>2</sup>.

Расчет:

1. На предварительной стадии проектирования рассчитаем по формулам 3.1 и 3.2 удельную массу проектируемого покрытия ( $G$ ) и относительную высоту покрытия ( $h/b$ ).

$$G_{\text{расч}} = 8,52905 + 0,03384 * q_{\text{расч}} - 0,2448 * \frac{a}{b}$$

$$= 8,52905 + 0,03384 * 240 - 0,2448 * \frac{68,4}{45} = 16,28 \text{ кг/м}^2$$

$$h/b_{\text{расч}} = 0,0393 + 0,00018 * q_{\text{расч}} - 0,0161 * \frac{a}{b}$$

$$= 0,0393 + 0,00018 * 240 - 0,0161 * \frac{68,4}{45} = 0,058$$

2. Создаем расчетную схему в программном комплексе LIRA-SAPR с соответствующими геометрическими размерами ячейки и прикладываем в узлы верхнего пояса покрытия расчетную нагрузку (Рис. 1). Выполняем расчет и находим усилия в каждом элементе конструкции.

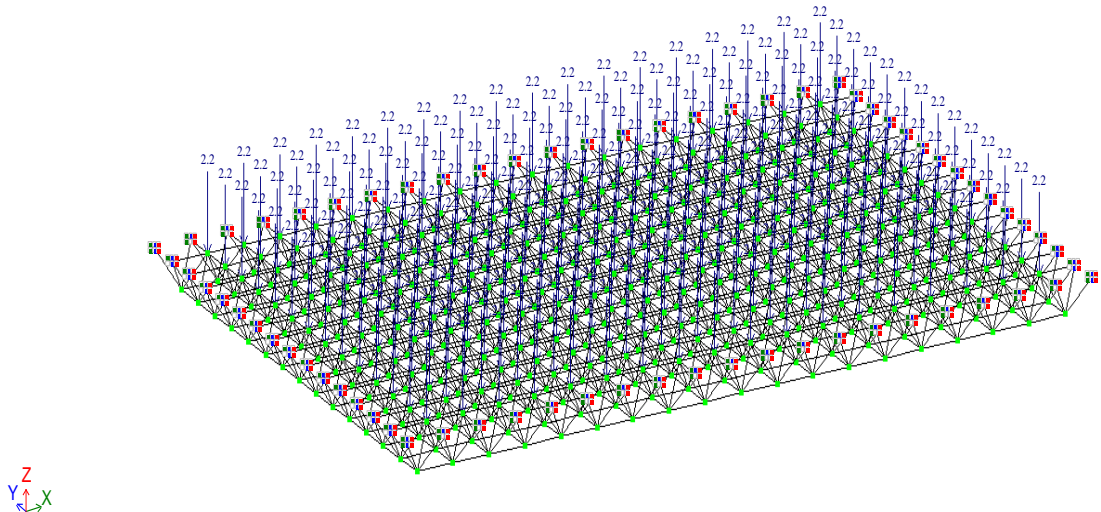


Рисунок 1 – Расчетная схема

3. Далее, используя программный комплекс по расчету и оптимальному проектированию структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах, разработанный на кафедре «Теоретическая и прикладная механика» ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», получаем на выходе данные, с подбором сечения по разработанной автором методике, представленные в таблице 1:

Таблица 1 – Выходные данные

| № п/п       | № элемента | Усилие в элементе, кН | Длина элемента, м | Подобранная площадь, см <sup>2</sup> |
|-------------|------------|-----------------------|-------------------|--------------------------------------|
| <b>1</b>    | 1          | 6,373                 | 3,04              | 4,241                                |
| <b>2</b>    | 2          | -24,518               | 3,03              | 5,710                                |
| <b>3</b>    | 3          | -30,627               | 3,02              | 5,710                                |
| ...         | -          | -                     | -                 | -                                    |
| <b>2212</b> | 2212       | 13,665                | 3,01              | 4,241                                |

Удельный вес покрытия, полученный в результате расчета:

$$15,8 \text{ кг/м}^2$$

Удельный вес покрытия, полученный на предварительной стадии расчета:

$$16,28 \text{ кг/м}^2$$

Разница, полученная на стадии предпроектных расчетов и стадии проектирования – 2,95%.

Относительная высота ( $h/b$ ) с учетом заданной высоты ячейки (2,74 м):

0,061

Относительная высота ( $h/b$ ) полученная на предварительной стадии расчета:

0,058

Разница, полученная на стадии предпроектных расчетов и стадии проектирования – 4,92%.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г**  
**(акты внедрения)**



**Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики**

**Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры»**

286123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2,  
тел.: +38 (062) 343-70-33, email: mailbox@donnasa.org, идент. код 02070795

от 04.09.2020 № 08

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.006.02  
при ГОУ ВПО «Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры»

**СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы  
Мущанова Александра Владимировича на тему «Действительная работа и  
формообразование стержневых структурных покрытий на нетиповом плане»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, зданий и сооружения.

Комиссия в составе: проректора по учебной работе, д.т.н., профессора  
Нездойминова В.И., декана строительного факультета, к.т.н., доцента Лозинского Э.А.,  
начальника учебного отдела, к.э.н., доцента Сухины А.А. свидетельствует, что при  
подготовке бакалавров по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство», профиль  
«Промышленное и гражданское строительство», в материале дисциплины  
«Металлические конструкции», 7 семестр и по направлению подготовки 08.04.01  
«Строительство», программа подготовки «Теория и проектирование зданий и сооружений  
(МК)» в материалах дисциплины «Особенности расчета, проектирования и эксплуатации  
уникальных зданий и сооружений» используются теоретические и практические данные  
по кандидатской диссертационной работе Мущанова Александра Владимировича  
«Действительная работа и формообразование стержневых структурных покрытий на  
нетиповом плане».

Члены комиссии:

Проректор по учебной работе,  
д.т.н., профессор

Декан строительного факультета,  
к.т.н., доцент

Начальник учебного отдела,  
к.э.н., доцент

 В.И. Нездойминов

Э.А. Лозинский

А.А. Сухина



ООО «Донецкий Промстройниипроект», 283004, г. Донецк, ул. Университетская, 112,  
Тел. (062)303-22-59 (дополнительные номера: проектная часть 01, научная часть 02, факс 22),  
E-mail: donpromstroy@gmail.com

28.09.2020 № 1/425-06  
На № 2-08/1-70 от 12.09.2020 г

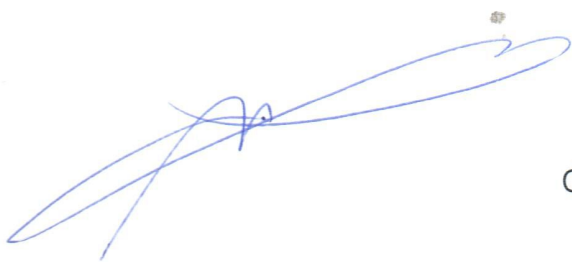
В специализированный совет по  
защите диссертаций

О внедрении результатов  
диссертационной работы

Результаты диссертационной работы соискателя **Муцанова А.В.** на тему **«Действительная работа и формообразование стержневых структурных покрытий на нетиповом плане»** использованы при оценке напряженно-деформированного состояния элементов структурных конструкций покрытия СК «ДОНБАСС АРЕНА». Работа выполнялась в рамках договора №8136 от 27.04.2020 г. по теме «Капитальный ремонт строительных конструкций СК «ДОНБАСС АРЕНА» по адресу ДНР, г. Донецк, ул. Челюскинцев, 189 Е. Рабочий проект».

Справка выдана для представления в специализированный диссертационный совет Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» для защиты кандидатской диссертационной работы и получения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»

С уважением,  
директор



С.В.Маликов