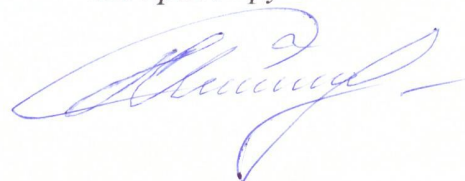


В печать
9.02.2021.

На правах рукописи



Мушанов Александр Владимирович

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

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Макезвка – 2020

Работа выполнена на кафедре металлических конструкций и сооружений Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

**Научный
руководитель:**

Доктор технических наук, профессор **Горохов Евгений Васильевич**, ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», заведующий кафедрой металлических конструкций и сооружений, профессор кафедры.

**Официальные
оппоненты:**

Зверев Виталий Валентинович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», заведующий кафедрой металлических конструкций, г. Липецк.

Гаранжа Игорь Михайлович

кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», доцент департамента строительства, г. Москва.

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь

Защита состоится «16» апреля 2021 г., в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 01.006.02 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38(062) 343-7033, e-mail: d01.006.02@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Д.01.006.02



Лахтарина Сергей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Перельмута 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 напряженно-деформированного состояния (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 покрытий. 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 (μ), и коэффициента продольного изгиба φ (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, выполненной 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 защемления 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** изложена общая характеристика работы, представлено обоснование актуальности темы, сформулированы цели и задачи исследований, представлены объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В **первом разделе** представлен критический анализ состояния вопроса. Оценка принципиальных конструктивных решений ячеек и узловых соединений структурных покрытий позволила определить направления совершенствования

конструктивных решений и подходы к формообразованию и проектированию оптимальных структурных покрытий.

Приближенные методы расчета многосвязной плиты, как дискретно-континуальной модели, предложенные профессором В.З. Власовым, развитые в работах Б.С. Василькова и И.Е. Милейковского, заложили основу для перехода к аналитическим методам расчета плиты, в основу которой положено решение задачи теории изгиба тонких пластинок (уравнение Софи-Жермен), наиболее полно представленное в трудах А.Г. Трущева. Также, один из интересных подходов к анализу НДС структурных покрытий был предложен Р.И. Хисамовым, базирующийся на расчете наиболее загруженной панели фермы с учетом развития пластических деформаций. Предложенные выше решения нашли развитие в работах исследователей ЦНИИСК им. Кучеренко, В.А. Гастева, Л.Н. Лубо, С.Г. Лехницкого, В.И. Трофимова, Г.Б. Бегуна, В.И. Каминского, В.К. Файбищенко, D. Arigisa, однако, как показала практика, такие методы возможно использовать преимущественно на стадии эскизного проектирования.

Численные методы, реализованные в конечно-элементной постановке, являются наиболее распространенным методом анализа НДС. В расчетной схеме отображены все стержневые элементы структурного покрытия, представляющего собой многократно статически неопределимую шарнирно-стержневую систему, в которой подбор сечений производится для каждого индивидуально замоделированного элемента. Основываясь на данных исследований А.А. Василькина, В.В. Денякова, Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, А.Б. Бондарева, А.М. Югова, М.Р. Гарифуллина, E. Gaylord, C. Gaylord, J. Stallmeyer, M. Schumacher, M. Buijsen, R. Hutchinson, N. Hubermana, C. Jianguo, A. Rosen, M. Sabag, J. Renton, N. Antonioua, M. Gordini, M. Habibi, V. Hassani, Cheng Lan, Xi Tu, Chao Li, Jia Xu, Cong Liu, Lin He, J. Dzwierzynska, A. Causevic, A. Salihbegovic, Xiaoshu Guan, Huipin Chen, R.A. Fitrah, Nonfriyandi R., Li-Min Tian, Jian-Peng Wei 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 стержневых покрытий.

При подборе сечений элементов в составе структурного покрытия, основополагающим являются вопросы устойчивости центрально-сжатых стержней. В основу конечно-элементного анализа устойчивости сжатых стержней

заложены фундаментальные исследования Л. Эйлера, Ф. Энгессера и Ф.С. Ясинского, Б.Г. Галеркина, И.Г. Бубнова, Н.С. Стрелецкого и А.Р. Ржаницина. Интеграцией результатов в единую систему описания процесса потери устойчивости с учетом влияния кривизны стержня послужили труды С.П. Тимошенко, Дж. Герэ и С.Д. Лейтеса. Рассматривая процесс потери устойчивости через призму конечно-элементного анализа, особое внимание следует уделить трудам А.В. Перельмутера и В.И. Сливкера. Также вопросами устойчивости занимались А.Ю. Солдатов, А.А. Артёмов, И.Д. Аникеев, А.В. Голиков, Б.Д. Аннин, А.Ю. Власов, В.И. Клименко, К.Д. Каримбаев, Д.С. Пальчиков, В.В. Зверев, И.М. Гаранжа, Р. Хуснутдинов, Ю. Коноплев, Y. Zheng, Q.-S. Mu, Fang Youngfeng, Wang Li, Bin Li, Hua Luo, Z. Kala. Отметим, что вопросы потери устойчивости в упругой и упруго-пластических 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.

Другим важным компонентом постановки задачи является выбор критерия качества проекта (критерия оптимальности). Обычно это экстремальное значение функции искомых параметров, называемой целевой функцией, или функцией цели. Наиболее широко применяемым критерием качества проекта является его металлоёмкость, что в своих работах использовали Я.М. Лихтарников, В.Н. Шимановский, М.Л. Гринберг, В.Н. Гордеев, И.В. Роменский, Е.В. Горохов, Я.В. Назим, В.Ф. Мушанов, Н.Р. Жук, С.В. Колесниченко, В.Ю. Алпатов, А.В. Андронников, А.В. Гинзбург, А.А. Василькин, И.В. Кучеренко, И.Н. Серпик, А.В. Алексейцев, П.Ю. Балабин, Н.С. Курченко, А.Г. Тамразян, Е.В. Яньков, M. Kociecki, H. Adeli, W. Zhang, K. Kawaguchi, M. Wu, N. Petrovic, N. Kostic, Jolanta Dzwierzynska, M. Kurniawan. A. Adha, C. Imediegwu, R. Murphy, R. Hewson, Neeraja D, P.S. Kumar. 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 расчетных моделей элементов структурных покрытий, не затрагивались.

В завершение раздела на основании выполненного критического анализа сформулированы цели, задачи и методы исследования, применяемые в работе.

Во втором разделе изложено обоснование возможности использования выбранных автором методик для проведения численных и экспериментальных исследований как потери устойчивости центрально-сжатых стержней, так и общей оценки НДС и оптимального проектирования структурных конструкций.

Наиболее рациональным для уточнения несущей способности центрально-сжатых стержней из условия устойчивости и с учетом конструктивного оформления узлов и пространственной работы стержневых элементов, выполненных из круглых труб, является МКЭ в форме метода перемещений. 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 (Таблица 1). 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.

Таблица 1 – Сравнение результатов расчета

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

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. Обоснование точности используемого к применению оборудования приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Обоснование возможности применения измерительного оборудования

Фиксируемый показатель	Тип используемого оборудования	Цена деления прибора	Погрешность измерения
1	2	3	4
Нагрузка	Гидродомкрат ДГ-100, ДГ-20	1 кгс/см ²	-
Относительная деформация	Тензорезистор КФ5П1-20-200-А-12-С1	-	±1 Ом
Перемещение	Индикатор часового типа ИЧ-10, прогибомер ПАО-6	0,01 мм	От 15 до 20 мкм
Изменение омического сопротивления	Модуль ввода сигналов тензодатчиков ОВЕН МВ110-224.4.ТД	0,01 МПа	±0.05 %

Для решения планируемой задачи оптимизации геометрической формы первоначально плоского структурного покрытия на нетиповом плане наиболее предпочтительным является метод Нелдера-Мида в силу его основных особенностей:

- 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.

Как показал предварительно выполненный анализ, наиболее эффективными управляющими параметрами оптимизации для получения оптимального решения являются соотношения f/l , h/l (Рисунок 1).

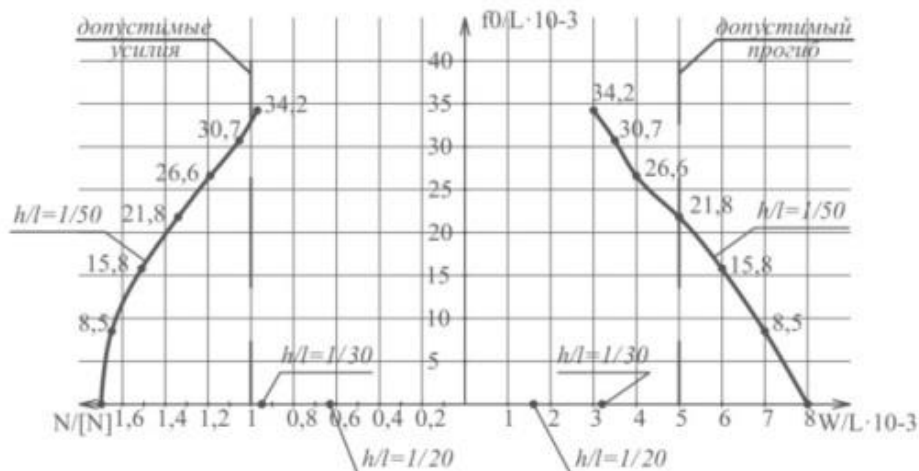


Рисунок 1 – Зависимость относительного прогиба (W/L) и уровня предельного усилия ($N/[N]$) от относительной стрелы обратного выгиба (f/L)

В третьем разделе представлены результаты исследования потери устойчивости центрально-сжатых стержней, полученные с использованием конечно-элементного анализа. Основными варьируемыми параметрами в исследовании выступают размеры конструкции узлового соединения и гибкость стержней (Рисунок 2).

Размеры элементов конструкций принимались в соответствии с унифицированным сортаментом системы МАРХИ, а гибкость элементов варьировалась в диапазоне 50-140. Разработанные в программном комплексе ЛИРА-САПР 2019 R1 модели выполнены из оболочечных элементов, позволяющих учесть в расчете нелинейные зависимости, как деформаций, так и

материала, от нагрузки. В моделях всем стержням заданы начальное несовершенство в виде отклонения от оси стержня по полуволне синусоиды

Загружение 1

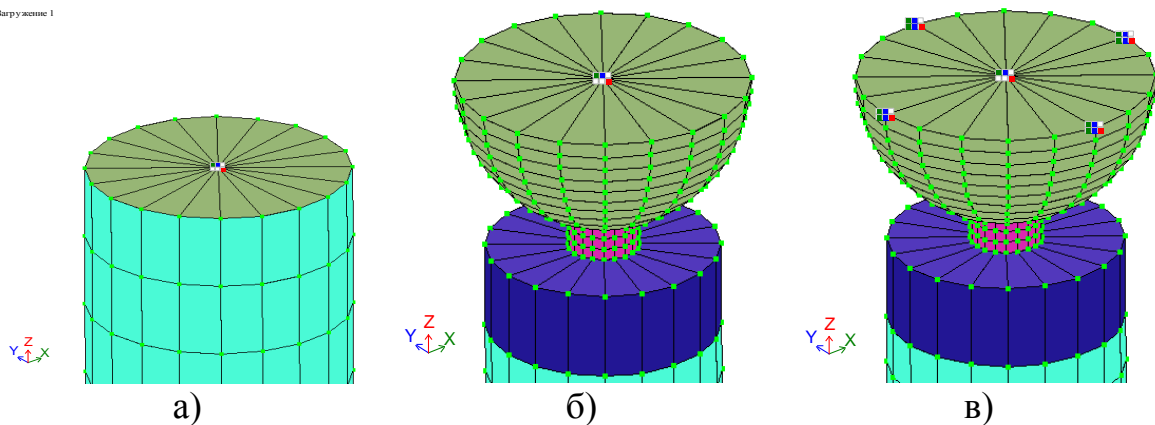
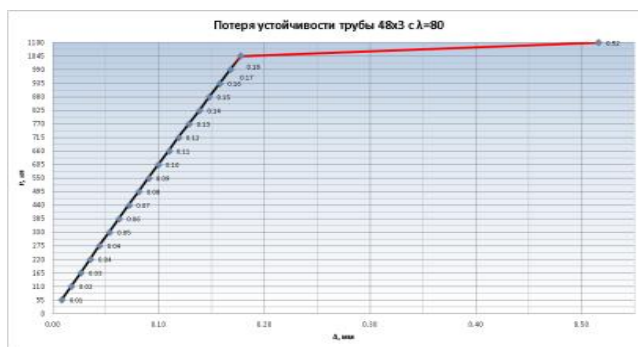
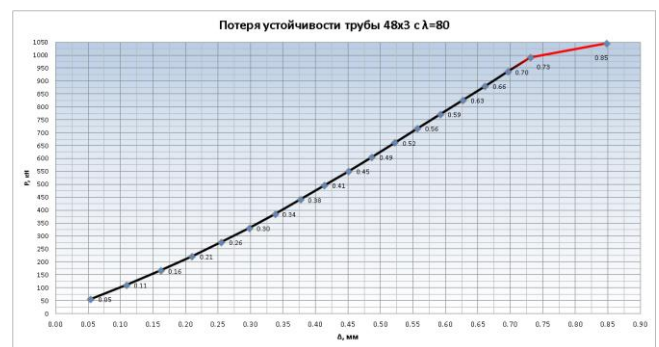


Рисунок 2 – Моделирование узлового соединения в ПК ЛИРА-САПР 2019

$f/l=1/700$ и диаграммы растяжения для стали С245 (для стержня и заглушки) и 40Х «Селект» (для болта и коннектора). В основу методологии исследования устойчивости положено сравнение критических напряжений, получаемых при различном моделировании стержней: стержень без узла (Рисунок 2, а), стержень с шарнирным закреплением (Рисунок 2, б) и стержень с жестким защемлением, отражающий работу стержня в составе покрытия (Рисунок 2, в). Графическое отображение влияния моделирования узлового соединения на несущую способность стержня представлено на рисунке 3 а, б в качестве зависимостей «нагрузка - перемещение».



а)



б)

Рисунок 3 – Потеря устойчивости стержня с жестким и шарнирным узлом

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. В результате установлено, что уточненная несущая способность центрально-сжатых стержней структурных покрытий из условия устойчивости, учитывающая влияние узловых соединений на вид деформированной оси стержня, а также пространственную работу

стержня-оболочки, с достаточной для практических расчетов точностью может быть описана зависимостью σ_p - λ :

$$y = 0.0004x^2 - 0.1536x + 28.681 \quad (1)$$

где: y – результирующий показатель (σ_p); x – значение гибкости (λ)

С целью возможности выполнения расчетов центрально-сжатых стержней из условия устойчивости в традиционной для отечественных норм проектирования форме на основе установленной зависимости (1) определены значения коэффициента приведения геометрической длины стержня к расчетной (μ), и коэффициента продольного изгиба φ (для стали $R_y = 240$ МПа), учитывающих гибкость и степень защемления стержня в соединениях структурных конструкций с шаровыми вставками-коннекторами. (Таблица 3).

Таблица 3 – Зависимости μ - λ , φ - λ

λ	50	60	70	80	90	100	110	120
μ	0.83	0.88	0.91	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95
φ	0.933	0.892	0.854	0.820	0.789	0.760	0.739	0.721

В четвертом разделе представлены экспериментальные исследования влияния узловых соединений структурных конструкций на устойчивость центрально-сжатых стержней. Исследуемая физическая модель создается с соблюдением принципов геометрического и физического подобия и имеет ту же качественную природу, что и моделируемый объект. В связи с наличием регламентирующего сортамента, как стержней, так и узловых вставок-коннекторов, масштабы-индикаторы (EI , EF , *геом. размеры*) приняты в масштабе 1:1 Для лабораторных испытаний в качестве экспериментальных исследований приняты две экспериментальные установки:

- ячейка структурного покрытия, раскосы которой потеряют устойчивость в упругой стадии работы материала ($\lambda_{\text{раскос}} = 120$) (Рисунок 5, 6 а, б).
- одиночный стержень, теряющий устойчивость в упругой стадии ($\lambda=120$) (рисунок 5, 6 в, г).

На основании предварительных результатов расчета уровень расчетной нагрузки на испытываемую модель №1 составил 22755 кг, что обусловило уровень критической силы в наклонных стержнях пирамиды $N_{кр(ч)} = -79,545$ кН. В свою очередь, уровень расчетной нагрузки на модель №2 – 8800 кг при $N_{кр(ч)} = -64,35$ кН.

Нагрузка на экспериментальные модели прикладывалась при помощи гидродомкратов. Для модели №1: ДГ-100 в верхний узел, для модели №2 – 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

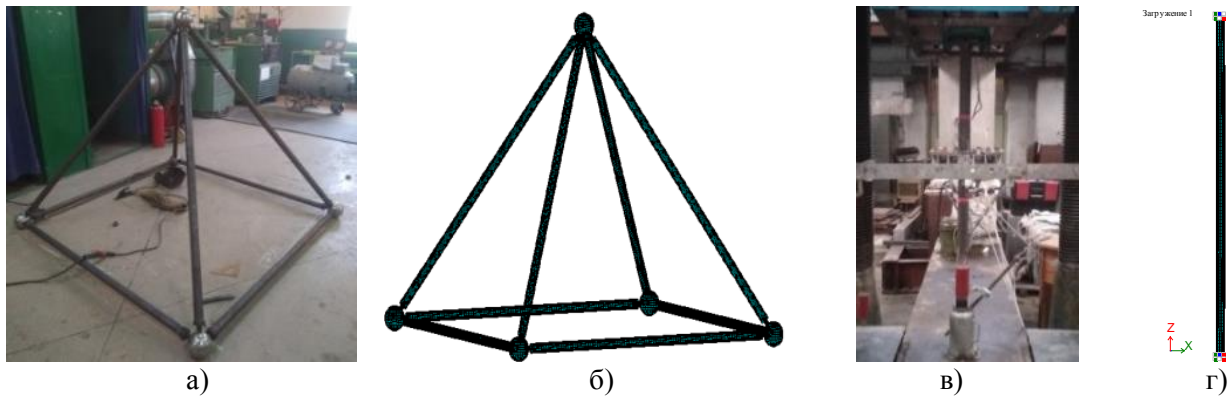


Рисунок 5 – Экспериментальные установки

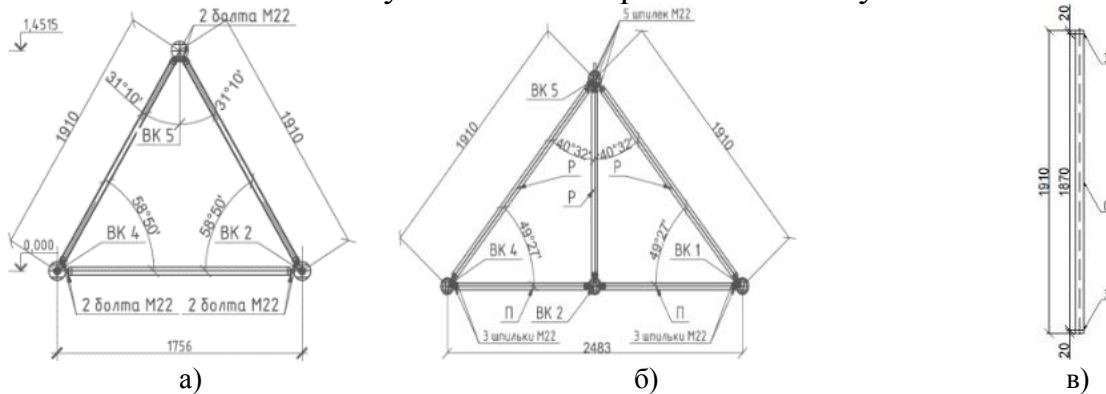


Рисунок 6 – Размеры установок

секунд (для восприятия и распределения нагрузки в конструкции). Такое решение обосновано тем, что скорость опроса всех активных тензорезисторов, подключенных к тензостанции ОВЕН, равна 7-ми опросам в секунду, что позволило максимально четко усреднить все полученные данные и выявить момент распределения и стабилизации в конструкции показаний тензорезисторов, которые записывались с помощью программы MasterSCADA и фиксировались в виде текстового файла. Показания индикаторов часового типа записывались вручную и фиксировались на видеокамеры.

Некоторые результаты испытаний приведены в таблицах 7-8 (значения критических продольных сил и их сравнение с численными исследованиями), а на рисунке 7 приведены графики возрастания изгибающих моментов вплоть до потери устойчивости в приопорном сечении (а) и в центре стержня (б). На рисунках 8.а-в представлены фотографии элементов, потерявших устойчивость, в экспериментальных моделях.

Таблица 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	-79.545	-47	-65.801	-80.245	-73.023	8.2	35.64

Таблица 8 – Массив критических нагрузок (по второму испытанию)

№ п/п	Массив критических нагрузок				Разница		
	$N_{кр(ч)}$, кН	$N_{кр(ДБН)}$, кН	$N_{кр(ср)}$, кН	$N_{кр(ОС)}$, кН	$\Delta 2-5$, %	$\Delta 3-5$, %	$\Delta 4-5$, %
1	-64.35	-47.2	-73.023	-57.41	10,78	17,78	21,038

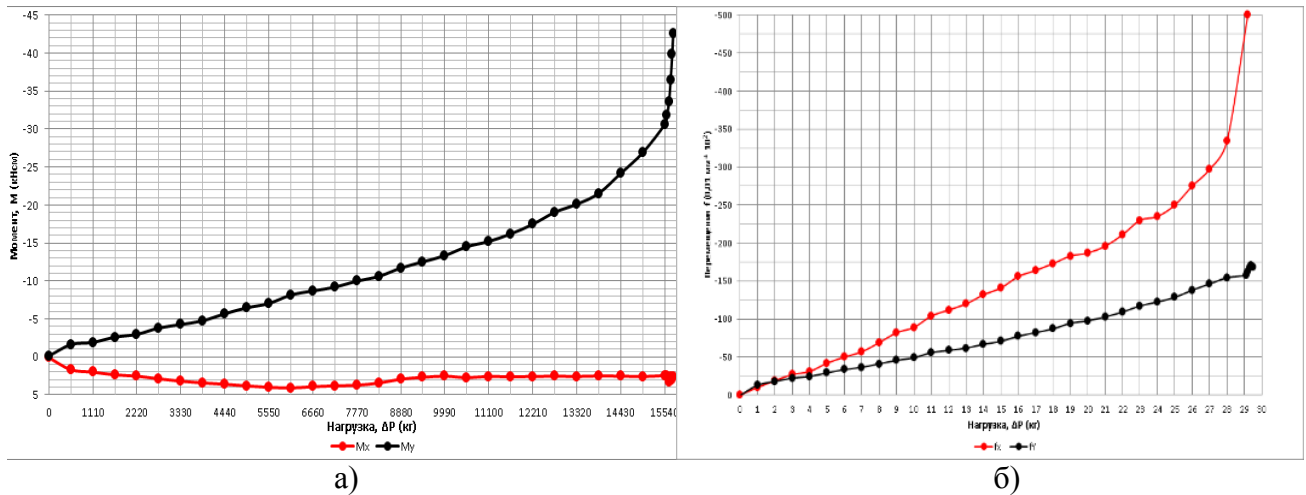


Рисунок 7 – Изменение момента в зависимости от приращения ($M_x - \Delta P$, $M_y - \Delta P$)



Труба 1 (модель №1)



Труба 2 (модель №1)



Труба 3 (модель №2)

Рисунок 8 – Вид элемента, потерявшего устойчивость

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили корректность результатов выполненных численных исследований в части увеличения несущей способности центрально-сжатых элементов структурного покрытия, обусловленного их заземлением в шаровых вставках коннекторах (расхождение результатов в пределах 8-11%).

В пятом разделе представлены результаты поиска оптимального конструктивного решения структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах. Предлагается минимизировать теоретическую массу конструкции, вычисляемую по конечным геометрическим параметрам структурных элементов, составляющих конструкцию.

$$G \rightarrow \min \left[\rho \left(\sum_{i=1}^n A_i l_i + \sum_{j=1}^m V_j \right) \right] \quad (2)$$

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

Алгоритм оптимизации структурного покрытия на нетиповом прямоугольном плане, базирующийся на выше предложенной функции цели и учитывающий возможность подбора сечений центрально-сжатых стержней, как в рамках общепринятых подходов, так и на основе методики, предложенной автором. По разработанному автором алгоритму на кафедре теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО ДонНАСА в кодах языка программирования MATLAB реализована программа по оптимизации конструктивной формы структурного покрытия на нетиповом прямоугольном плане (Рисунок 9). Используя возможности разработанного алгоритма, оптимизация исходных проектных решений выполнена в 2-х вариантах:

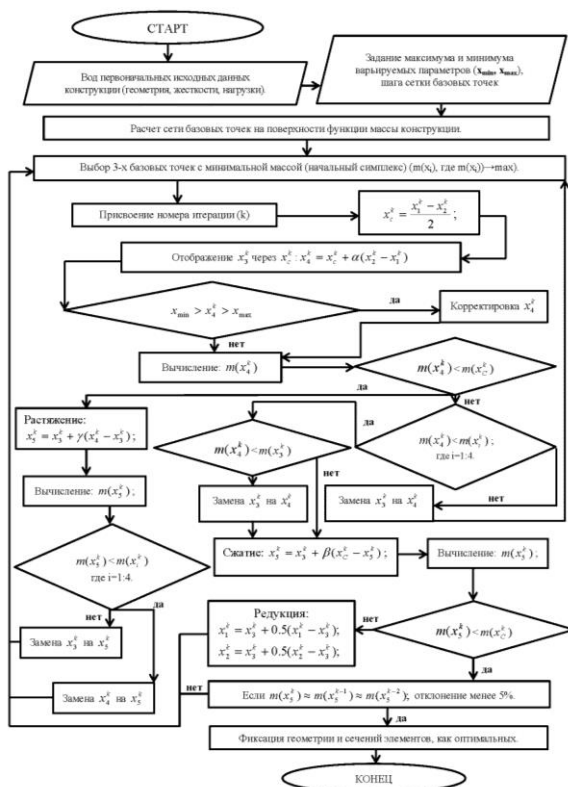


Рисунок 9 – Блок-схема реализации алгоритма оптимизации

– при сохранении плоской формы исходного проектного решения и поиска оптимального решения путем варьирования 1-го параметра – относительной высоты покрытия (h/b).

– 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).

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 оптимального проектирования;
- изменение расчетных нагрузок происходит в диапазоне от 40 до 240 кг/м² (нижняя граница соответствует максимальному значению расчетной постоянной нагрузки при отсутствии снеговой нагрузки. Верхняя граница – сумме постоянной и максимальной снеговой нагрузки.
- 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 вариантах, 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 $\sigma_{кр} \leq \sigma_{кр}^{расч}$).

При этом выполнение расчетов НДС выполнялось при условии подбора сечений центрально-сжатых элементов по 2-м методикам: нормативная (в соответствии с ДБН), и с использованием зависимости (1), полученной в работе. Статистическая обработка массива данных выполняется с помощью функции «ЛИНЕЙН» (множественная линейная регрессия) в программе Microsoft EXCEL 2010. Поиск искомой функции для значения удельного веса покрытия ($G_{расч}$), относительной высоты покрытия (h/b) и стрелы выгиба (f/b) выполнен по формуле (3) для множественной линейной регрессии.

Таблица 9 – Результаты оптимизации проектных решений конструктивной формы покрытий на нетиповом плане

№ п/п	План	Расчет нагр. (кг/м ²)	Оптимальные геометрические параметры			Масса конструкции (т)	
			по 1-му параметру	по 2-м параметрам		До оптимизации	После оптимизации (по 2-м пар.)
			h (м)	h (м)	f (м)		
1	45x45	40	1.523	0.7031	7.856	22.67410	19.61010
2		100	1.934	0.7031	6.071	25.15560	21.77570
3		160	2.508	0.7031	5.174	28.60030	23.38400
4		240	2.836	0.7031	9.999	33.27580	25.80620
5	45x68	40	1.523	0.7031	4.285	30.83470	27.36060
6		100	2.344	0.7031	7.142	35.59170	30.92140
7		160	2.672	0.7031	7.856	41.30580	33.75050
8		240	3.000	0.7031	9.999	49.89960	37.10420
9	45x90	40	1.523	0.7031	4.107	40.82280	36.59150
10		100	2.508	0.7031	7.142	47.85630	40.68090
11		160	2.672	0.7031	9.999	56.22520	43.97220
12		240	3.000	0.7031	8.571	68.27860	48.92690
13	45x108	40	1.523	0.7031	4.285	50.16080	45.18870
14		100	2.508	0.7031	7.856	59.24530	49.39490
15		160	2.672	0.7031	8.928	69.07500	52.60220
16		240	3.492	0.7031	9.999	85.05950	59.66300
17	45x126	40	1.605	0.7031	5.000	57.59710	51.77130
18		100	2.508	0.7031	9.999	69.58510	58.43290
19		160	2.672	0.7031	9.999	82.64190	63.10020
20		240	3.328	0.7031	9.999	100.48210	70.88510

В таблице 10 представлены все результирующие формулы, позволяющие на основании задания варьируемых параметров проектирования вычислить оптимальные параметры конструкции.

Таблица 10 – Результирующие формулы регрессионных зависимостей

$y = b_0 \pm b_1 x_1 \pm b_2 x_2 \quad (3)$ <p>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</p>		
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	0.91912

$y = b_0 \pm b_1 x_1 \pm b_2 x_2 \quad (3)$ 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.
	центрально-сжатых стержней по предложенной методике	
$G_n = 8,24686 + 0,01873 * q + 0,47052 * a/b$	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

Серьезное влияние на металлоемкость покрытия и его оптимальные геометрические параметры оказывает податливость опорных конструкций, которую необходимо учитывать при разработке проектного решения. В таблице 11 приведены результаты исследований для плана 45х90 м при различных соотношениях изгибной жесткости опорных конструкций и пролетной части покрытия.

Таблица 11 – Результаты оптимизации проектных решений конструктивной формы структурного покрытия на прямоугольном плане 45х90 и с учетом податливости опорных конструкций

№ п/п	Соотн.. жестк. k_I^*	Расчет. нагрузк а, кг/м ²	Оптимизация по 2-м параметрам,		Оптимальная масса констр. (т)	
			h, м	f, м	На неподвижном контуре	На податливом контуре
1	∞	40	0.7031	10	36.5915	-
2		100	0.7031	10	40.6809	-
3		160	0.7031	10	43.9722	-
4		240	0.7031	10	48.9269	-
5	10:1	40	2.344	10	-	41.1891
6		100	3.574	9.582	-	44.4607
7		160	3.574	10	-	47.9923
8		240	2.139	10	-	52.8858
9	1:1	40	3.574	10	-	35.4780
10		100	3.369	10	-	39.4016

№ п/п	Соотн.. жестк. k_1^*	Расчет. нагрузк а, кг/м ²	Оптимизация по 2-м параметрам,		Оптимальная масса констр. (т)	
			h, м	f, м	На неподвижном контуре	На податливом контуре
11	1:10	160	3.164	10	-	44.2709
12		240	2.344	10	-	48.1244
13		40	3.369	9.791	-	35.8015
14		100	2.344	6.666	-	42.7381
15		160	2.344	10	-	45.7710
16		240	2.344	10	-	50.9836

* Примечание: $k_1 = EI/Db$, где k_1 – коэффициент, учитывающий влияние соотношения изгибной жесткости пролетной части и опорных конструкций на оптимальные параметры проектирования; EI – изгибная жесткость опорных конструкций (колонн); D – цилиндрическая жесткость плиты покрытия, b – шаг опорных конструкций (колонн) в поперечном направлении.

В таблице 12 приведены расчетные регрессионные зависимости, позволяющие назначить с учетом податливости опорных конструкций основные геометрические параметры проектируемой конструкции, обеспечивающие оптимальный расход стали.

Таблица 12 - Результирующие формулы регрессионных зависимостей на податливых опорах*

№ п/п	Формула	Описание	Коэф. корр.
1	$G_{расч} = 8,63805 - 0,00034 * k_1 + 0,01923 * q_{расч}$	Удельная масса, вычисленная по оптимальной высоте и стреле выгиба покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам	0.958859
2	$G_{расч} = 8,74417 - 0,00037 * k_1 + 0,01587 * q_{расч}$	Удельная масса, вычисленная по оптимальной высоте и стреле выгиба покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по предложенной методике.	0.933453
3	$h/b_{расч} = 0,064894 - 0,000046 * k_1 - 0,000021 * q_{расч}$	Относительная высота, вычисленная по оптимальным высоте и стреле выгиба покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по действующим нормативным документам.	0,784184
4	$h/b_{расч} = 0,072853 - 0,000048 * k_1 - 0,000066 * q_{расч}$	Относительная высота, вычисленная по оптимальной высоте и стреле выгиба покрытия. Формулу применять при подборе центрально-сжатых стержней по предложенной методике.	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).

Анализируя, приведенные зависимости, можно сделать выводы о значительном сокращении металлоемкости покрытия, обусловленного как изменением его геометрии, так и использованием уточненного подхода к оценке несущей способности центрально-сжатых стержней

ВЫВОДЫ

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 μ и φ , 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».

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Мущанов А. В., Роменский И. В. Учет особенностей конструктивных решений системы МАРХИ при разработке индивидуального проекта большепролетного структурного покрытия [Текст] // Сборник докладов Пятой Международной научно-практической конференции (Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях). – М.: Изд-во МГСУ, 2013. – С. 111-115.

2. 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. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. Сб.науч.тр. – Макеевка: ДонНАСА, 2014. – Выпуск 2014-4 (108). – С. 74-77.

3. И.В. Роменский, Т.И. Загоруйко, А.В. Мущанов. Основные подходы к назначению пространственных и жесткостных характеристик покрытия системы МАРХИ при регулировании параметров его напряженно-деформированного состояния [Текст] // Металлические конструкции. – 2015. – ТОМ 21, НОМЕР 1. – С. 5-14.

4. Е.В. Горохов, В.Ф. Мущанов, И.В. Роменский, А.В. Мущанов. Влияние геометрических параметров на напряженно-деформированное состояние структурного покрытия на прямоугольном плане [Текст] // Металлические конструкции – 2015. – ТОМ 21, НОМЕР 4. – С.191-206.

5. 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 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/1\(40\)/1_muschanov_40.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/1(40)/1_muschanov_40.pdf)

6. Мущанов А.В., Мущанов В.Ф., Роменский И.В. Рациональные геометрические и жесткостные параметры большепролетного структурного покрытия [Текст] // Строительство уникальных зданий и сооружений – 2016. – №1(40). – С. 18-29 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/2\(41\)/2_muschanov_41.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2016/2(41)/2_muschanov_41.pdf)

7. Е.В. Горохов, А.В. Мущанов. Учёт конструктивных особенностей узловых соединений в расчетах устойчивости центрально сжатых стержней структурных покрытий [Текст] // МК Металлические конструкции 2016, ТОМ 22, НОМЕР 3, С.125-137. ISSN 1993-3517 online.

8. Е.В. Горохов, А.В. Мущанов. Анализ влияния конструктивных особенностей узловых соединений на несущую способность центрально сжатых стержней структурных покрытий [Текст] // Металлические конструкции. 2017. – ТОМ 23, НОМЕР 3. – С. 139-151. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2017-3/04_gorokhov_mushchanov.pdf

9. 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 [Текст] // Металлические конструкции. 2018. – ТОМ 24, НОМЕР 3. – С. 105-121. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2018/3/02_gorokhov_tanasoglo_mushanov.pdf

10. Мущанов В.Ф., Оржиховский 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) (Белгород, 29 апреля 2019). – Белгород: БГТУ, 2019. – С. 75-79

11. Е.В. Горохов, И.В. Роменский, А.В. Мущанов, Н.С. Осипов. Регулирование усилий в структурных конструкциях методом обратного выгиба [Текст] / ВЕСТНИК Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. Сб. науч. тр. – Макеевка: ДонНАСА, 2019. – Выпуск 2019-3 (137). – С. 46-50.
12. А.В. Мущанов. Оптимальные конструктивные решения структурных покрытий на прямоугольных нетиповых планах [Текст] // Металлические конструкции. 2020. – ТОМ 26, НОМЕР 1. – С.37-48. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2020-1/04_mushchanov.pdf
13. Е.В. Горохов, В.Н. Васылев, А.В. Мущанов, А.Н. Волчков. Экспериментальное исследование влияния узловых соединений структурных конструкций на устойчивость центрально-сжатых стержней [Текст] // Металлические конструкции. 2020. – ТОМ 26, НОМЕР 2. – С.87-101. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2020-2/04_horokhov_vasylev_mushchanov_volchkov.pdf

АННОТАЦИЯ

Мущанов Александр Владимирович. **Действительная работа и формообразование стержневых структурных покрытий на нетиповом плане.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2020 г.

Диссертация посвящена разработке подходов к проектированию оптимальных конструктивных форм структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах с учетом значимых параметров проектирования и уточнению несущей способности центрально-сжатых стержней экспериментальными и теоретическими исследованиями их устойчивости в упругой и упруго-пластической стадиях работы материала.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи, представлены объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна, практическая ценность результатов работы и ее связь с государственными программами.

В **первом разделе** анализируется состояние вопроса. Проведен критический анализ аналитических и численных методов исследования НДС структурных конструкций, влияние процесса потери устойчивости центрально-сжатых

стержней на их несущую способность. Анализируются управляющие и варьируемые параметры при оптимизации структурных конструкций.

Во втором разделе обосновано использованием выбранных методик для проведения численных и экспериментальных исследований как потери устойчивости центрально-сжатых стержней, общей оценки НДС структурных конструкций, так и методов к решению задачи оптимизации геометрической формы структурного покрытия.

В третьем разделе представлены результаты численных исследований потери устойчивости центрально-сжатых стержней в упругой и упруго-пластической стадиях работы материала. Построена модель для регрессионного анализа, на основе которой уточнена несущая способность центрально-сжатых стержней структурных конструкций с шаровыми узловыми вставками-коннекторами.

В четвертом разделе представлены экспериментальные исследования влияния узловых соединений структурных конструкций на устойчивость центрально-сжатых стержней. Создана физическая модель ячейки структурного покрытия и одиночного стержня без узловых соединений в масштабе 1:1, на основе испытания которых выполнена верификация результатов численных исследований. По данным проведенного экспериментального исследования установлено увеличение несущей способности центрально-сжатого стержня с теоретическим значением $\lambda=120$ до 37% (по данным численного исследования – до 50%) по сравнению с теоретическим значением $\sigma_{кр.теор.}$

В пятом разделе представлены результаты поиска оптимального конструктивного решения структурных покрытий на нетиповых прямоугольных планах. 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, учетом возможного изменения общей геометрии конструкции покрытия и податливости опорных конструкций.

Ключевые слова: металлические большепролетные конструкции, структурные покрытия, напряженно-деформированное состояние, устойчивость центрально-сжатых стержней, метод конечных элементов, оптимизация структурных покрытий.

ABSTRACT

Mushchanov Alexander. **Valid work and formation of rods spatial structures on the unusual plan.** - Manuscript.

Thesis submitted for the scientific degree of Candidate of Technical Science in specialty 05.23.01 - Building constructions, buildings and structures. - Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, 2020.

The thesis is devoted to the development of approaches to the design of optimal structural forms of structural coatings on atypical rectangular plans, taking into account significant design parameters and clarification of the bearing capacity of centrally compressed rods by experimental and theoretical studies of their stability in the elastic and elastic-plastic stages of material operation.

The **introduction** substantiates the relevance of the research topic, formulates goals and objectives, presents the object and subject of research, formulates the scientific novelty, the practical value of the work results and its relationship with state programs.

The first section analyzes the state of the issue. A critical analysis of analytical and numerical methods for studying the stress-strain state of structural structures, the influence of the process of buckling of centrally compressed rods on their bearing capacity is carried out. Controlling and variable parameters are analyzed in the optimization of structural structures.

The second section, it is substantiated by the use of the selected techniques for carrying out numerical and experimental studies of both the buckling loss of centrally compressed rods, the general assessment of the stress-strain state of structural structures, and methods for solving the problem of optimizing the geometric shape of the structural coating.

The third section presents the results of numerical studies of the loss of stability of centrally compressed rods in the elastic and elastic-plastic stages of material operation. A model for regression analysis was built, on the basis of which the bearing capacity of centrally compressed rods of structural structures with spherical nodal inserts-connectors.

The fourth section presents experimental studies of the influence of nodal joints of structural structures on the stability of centrally compressed rods. A physical model of a structural coating cell at a 1: 1 scale has been created. According to the data of the experimental study, an increase in the bearing capacity of a centrally compressed bar with a theoretical value of $\lambda = 120$ to 37% (according to the data of a numerical study - up to 50%) compared with the theoretical value of σ_{cr} .

The fifth section, the results of the search for the optimal constructive solution of structural coatings on atypical rectangular plans are presented. An algorithm for the optimal design of structural pavements on atypical rectangular plans is proposed, which differs from those previously developed by the possibility of a refined assessment of the bearing capacity of centrally compressed rods from the stability condition, taking into account the possible change in the general geometry of the pavement structure and the flexibility of the supporting structures.

Key words: metal large-span structures, structural coatings, stress-strain state, stability of centrally compressed rods, finite element method, optimization of structural coatings.