

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

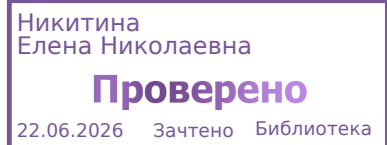
Гусев Андрей Николаевич

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ**

Направление подготовки
08.04.01 – «Строительство»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2026



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре
государственный университет»

Научный руководитель: Щербаков Иван Федорович
кандидат технических наук, доцент

Рецензент: Головки Александр Владимирович
доцент кафедры "Строительные конструкции,
здания и сооружения" Дальневосточного госу-
дарственного университета путей сообщения,
кандидат технических наук.

Защита состоится «18» июня 2026 г. в 12 часов 00 мин. на заседании
государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки
08.04.01 «Строительство» в Комсомольском-на-Амуре государственном уни-
верситете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27,
ФГБОУ ВО «КНАГУ» ауд. 329/4.

Автореферат разослан 13 июня 2026 г.

Секретарь ГЭК

И.В. Погорельских

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Современное градостроительство и развитие инфраструктуры характеризуются растущим спросом на здания и сооружения с большими внутренними пространствами, свободными от промежуточных опор. Это обусловлено как функциональными требованиями к объектам (например, выставочные комплексы, спортивные арены, производственные цеха), так и стремлением к созданию архитектурно выразительных и эстетически привлекательных конструкций. Большепролетные металлические конструкции благодаря своим уникальным свойствам становятся незаменимым решением для реализации сложных и масштабных проектов.

Актуальность темы исследования большепролетных металлических конструкций определяется, в первую очередь, высокими требованиями к безопасности и надежности данных сооружений. Эти конструкции, часто используемые для возведения зданий и сооружений с большим скоплением людей, таких как стадионы, выставочные центры и аэропорты и т.д., требуют особого внимания к обеспечению их устойчивости, прочности и долговечности. Ошибки в проектировании, недооценка нагрузок или воздействий могут привести к серьезным последствиям, включая обрушение конструкций, что подчеркивает необходимость постоянного совершенствования методов расчета и проектирования. Данное исследование направлено на выявление особенностей, влияющих на безопасность и надёжность большепролетных металлических конструкций, и на разработку рекомендаций по их учёту в проектной практике.

Целью диссертационной работы «Особенности проектирования большепролетных металлических конструкций» является разработка научно обоснованных методик и практических рекомендаций по проектированию эффективных и надежных большепролетных металлических конструкций с учетом современных методов оптимизации, нормативных требований Российской Федерации и специфических внешних воздействий.

Научная новизна работы заключается в уточнении классификации большепролетных металлических конструкций с учетом современных тенденций и применяемых материалов, в адаптации методики использования методов оптимизации для специфических типов большепролетных систем (в частности, вантовых и пространственных рам), в разработке комплексного подхода к численному моделированию, интегрирующего возможности Mathcad и LIRA-FEM для решения задач проектирования большепролетных конструкций с учетом сейсмических и температурных воздействий.

Практическая ценность заключается в разработке рекомендаций по выбору рациональных конструктивных схем большепролетных сооружений для различных условий эксплуатации; в создании алгоритмов расчёта и проектирования, учитывающих актуальные нормативные требования РФ и способствующих повышению безопасности и экономической эффективности проектов; в подготовке практических примеров проектирования (ангар, мост), демонстрирующих применение предложенных методик и позволяющих оценить их эффективность; в обосновании применения современных программных комплексов для решения сложных инженерных задач в области проектирования большепролетных конструкций.

Апробация работы и публикации

Основные положения диссертации опубликованы в научной статье, посвящённой классификации вантовых конструкций и вантовых зданий (соавторы А.Н. Гусев, О.Е. Сысоев). Материалы диссертации были доложены и обсуждены на название конференции Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 70-летию со дня образования Комсомольского-на-Амуре государственного университета, Комсомольск-на-Амуре, 07–08 октября 2025 года. Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025. – С. 383-386. – EDN KPREQZ.

Объем и структура диссертации

В диссертационной работе представлены: введение, 3 главы, библиографический список из 35 наименований. Работа отображена на 80 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков, 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, предмет и объект исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость, апробация результатов.

В **первой главе** «Аналитический обзор и теоретические основы проектирования большепролетных металлических конструкций» выполнен аналитический обзор и систематизированы теоретические основы проектирования большепролетных металлических конструкций (БМК). Уточнена классификация БМК с разделением на плоскостные (балочные, рамные, арочные, ферменные) и пространственные (вантовые, мембранные, оболочки, структурные плиты) системы, определены их рациональные области применения, преимущества и недостатки. Многообразие задач, решаемых с помощью таких конструкций, привело к появлению широкого спектра их типов.

Детальная типология большепролетных металлических конструкций включает:

Плоскостные системы:

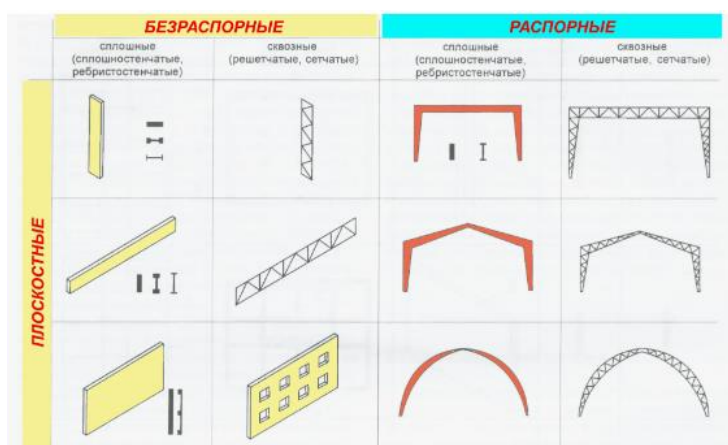


Рисунок 1 – Плоскостные системы

Балочные конструкции:

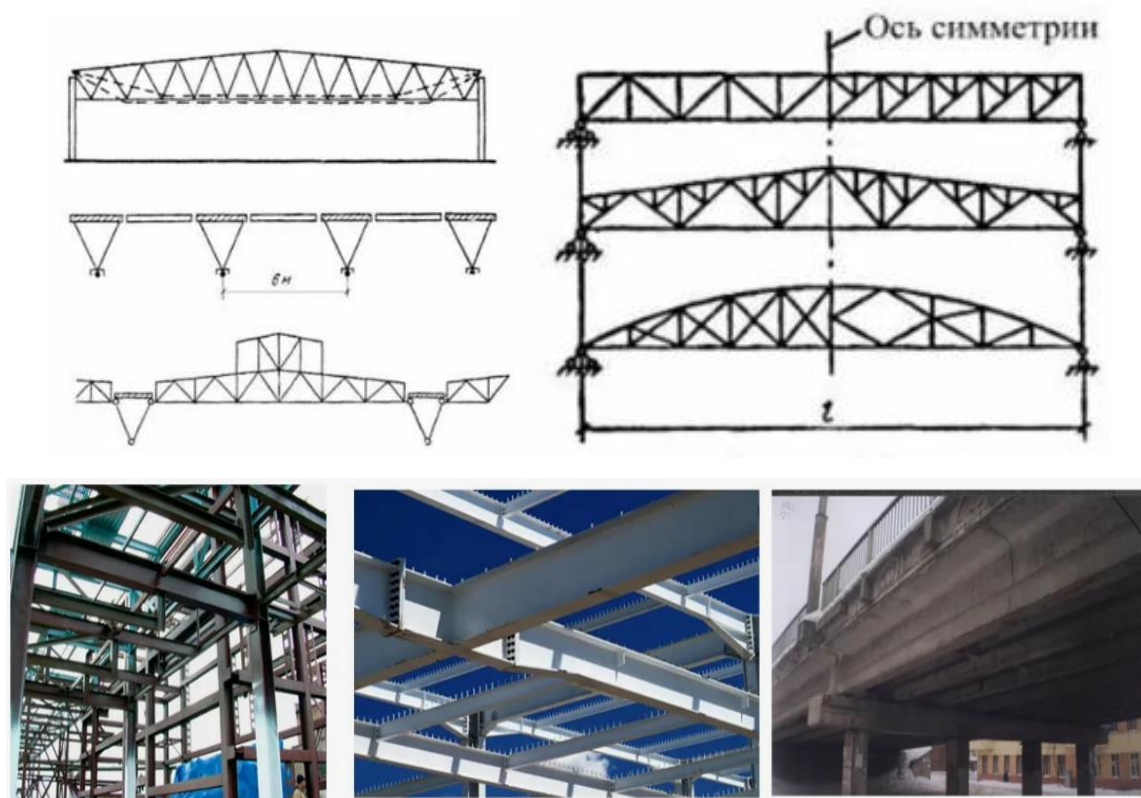


Рисунок 2 - Балочные конструкции

Простейший тип, включающий сплошнотенчатые и решетчатые балки. Эффективны для относительно небольших пролетов, но при их увеличении значительно возрастает металлоемкость [1].

Рамные конструкции:



Рисунок 3 - Рамные конструкции

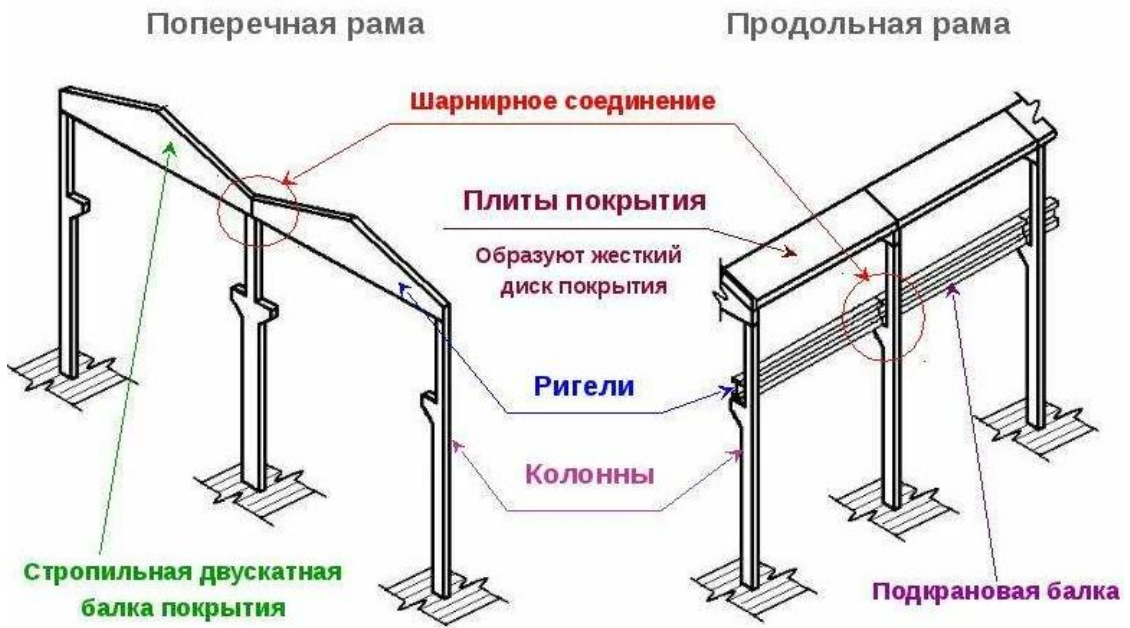


Рисунок 4 - Рамные конструкции

Состоят из стоек и ригелей, жестко или шарнирно соединенных между собой. Позволяют создавать свободные внутренние пространства. Могут быть одно- и многопролетными [1].

Обзор и классификация вантовых конструкций и вантовых зданий

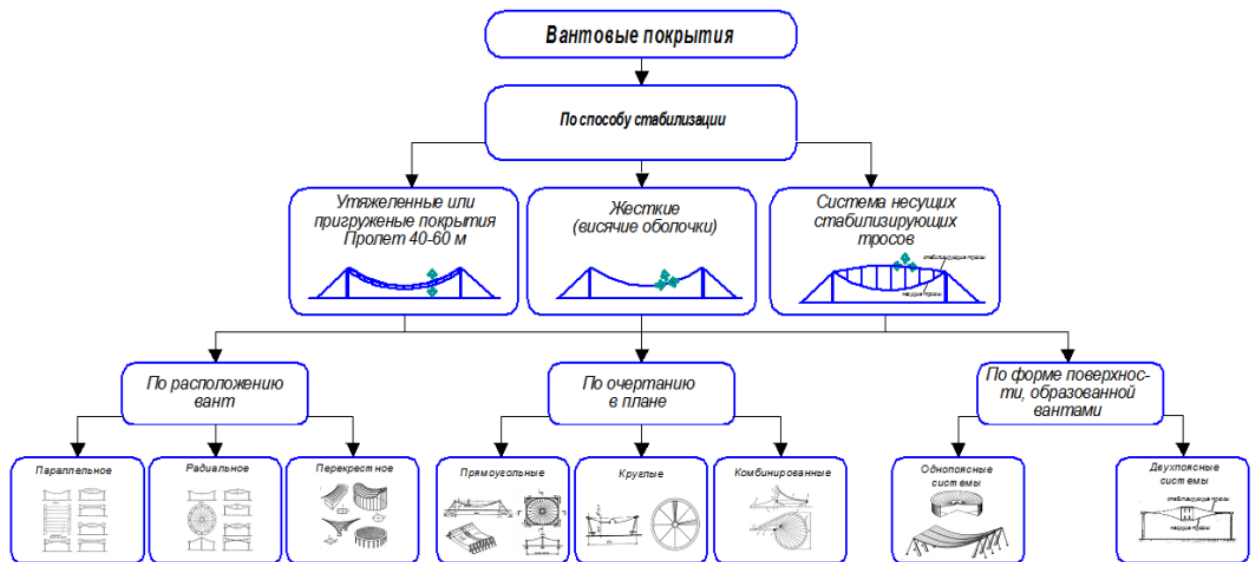


Рисунок 5 - Классификация вантовых покрытий

Вантовые конструкции представляют собой прогрессивный тип несущих систем, получивший широкое распространение в современном строительстве благодаря своей эффективности, легкости и архитектурной вырази-

тельности. Основным принципом их работы заключается в использовании гибких стальных элементов – вант (канатов, тросов), работающих преимущественно на растяжение. Это позволяет перекрывать очень большие пролеты с минимальным расходом материала. История развития вантовых систем насчитывает несколько десятилетий, и за это время они нашли применение в самых разнообразных сооружениях – от мостов до покрытий уникальных зданий [6].

Конструктивные элементы вантовых систем включают сами ванты (изготавливаются из высокопрочной стальной проволоки, могут быть одиночными или пучковыми, требуют специальной анкеровки), пилоны или мачты (воспринимают сжимающие усилия от вант), опорные контуры (распределяют усилия от вант на другие конструкции здания или фундаменты) и стабилизирующие элементы (дополнительные ванты, распорки, балки жесткости) [5].

Особенности проектирования вантовых зданий связаны с их специфической работой. Это большепролетные покрытия стадионов, выставочных павильонов, концертных залов [3, 4],



Рисунок 6 – Пример вантовых конструкций

а также различные мачтовые и подвесные системы. Отмечается, что, несмотря на широкое применение, до недавнего времени отсутствовала единая общепринятая классификация вантовых конструкций. Профессор С.Н. Кривошапко в своих работах [6, 12, 13, 14] уделяет значительное внимание этому вопросу, предлагая новые подходы к систематизации и анализируя большое количество реализованных объектов.

Пространственные рамы находят широкое применение в качестве несущих каркасов одноэтажных и многоэтажных промышленных и гражданских зданий, а также в конструкциях покрытий больших пролетов.

Эффективность пространственных рам во многом определяется рациональным конструированием узлов.

Проведён анализ мирового опыта возведения знаковых объектов, выявлены современные тенденции развития: стремление к перекрытию сверхбольших пролётов, применение высокопрочных и лёгких материалов, внедрение адаптивных систем, интеграция несущих конструкций с архитектурным замыслом. Систематизирована актуальная нормативная база РФ (СП 16.13330, СП 20.13330, СП 14.13330, ГОСТ 27772 и др.), регламентирующая выбор материалов, расчёт по предельным состояниям, учёт нагрузок и воздействий. Отдельно детально рассмотрены и классифицированы вантовые конструкции (по типу опор, расположению вант, конструктивной форме) и пространственные рамные системы (по статической схеме, типу элементов и узловых соединений), проанализированы особенности их работы, включая геометрическую нелинейность вантовых систем и пространственный характер деформирования рам. Результаты обзора позволили обосновать актуальность и сформулировать задачи дальнейших исследований, направленных на совершенствование методов расчёта и оптимизации БМК с учётом сейсмических и температурных воздействий.

Во второй главе «Методы оптимизации и учет внешних воздействий при проектировании большепролетных металлических конструкций» проведён анализ современных методов оптимизации большепролетных металличе-

ских конструкций (БМК). Систематизированы параметрическая оптимизация (подбор сечений при фиксированной схеме), оптимизация формы (изменение геометрических очертаний) и топологическая оптимизация (формирование рациональной структуры «с нуля»); дана их сравнительная характеристика, определены области эффективного применения и возможности программной реализации (LIRA-FEM, SCAD, ANSYS). Показано, что для специфических типов БМК, в частности вантовых систем и пространственных рам, существующие общие методики требуют адаптации, учитывающей геометрическую нелинейность, предварительное напряжение и сложный пространственный характер деформирования.

Детально рассмотрены принципы учёта сейсмических воздействий согласно СП 14.13330, включая обязательный учёт вертикальной составляющей для конструкций с пролётом более 24 м, и температурных климатических воздействий согласно СП 20.13330 с анализом их влияния на статически неопределимые БМК. Выполнен анализ совместного действия нагрузок и правил формирования особых сочетаний, в том числе для сейсмических и температурных воздействий, с учётом ограничений принципа суперпозиции при нелинейной работе конструкций.

Предложен и обоснован комплексный подход к численному моделированию БМК, интегрирующий вычислительную среду Mathcad (для аналитических расчётов, параметрических исследований и построения вспомогательных алгоритмов) и программный комплекс LIRA-FEM (для создания детальных пространственных конечно-элементных моделей, выполнения статических, динамических и нелинейных расчётов, подбора сечений и формирования РСУ). Показано, что такое сочетание позволяет эффективно решать задачи оптимизации и оценки напряжённо-деформированного состояния БМК с учётом сейсмических и температурных воздействий при соблюдении актуальных нормативных требований РФ.

В третьей главе «Практическая реализация расчетов и анализ результатов» выполнена практическая реализация предложенного комплексного

подхода к проектированию большепролетных металлических конструкций (БМК) с учётом сейсмических и температурных воздействий. Объектами исследования служили арочный ангар пролётом 36 м и автодорожный мост балочной разрезной системы пролётом 60 м. Для каждого объекта разработаны детальные пространственные конечно-элементные модели в среде LIRA-FEM, выполнены аналитические верификационные расчёты в Mathcad, произведён сбор постоянных и временных нагрузок согласно СП 20.13330.2016, сформированы расчётные сочетания усилий и проведён динамический анализ для площадки с фоновой сейсмичностью 8 баллов (СП 14.13330.2018) и с нормативным температурным перепадом ± 50 °С.

Моделирование конструкции ангара выполнялось стандартными средствами программного комплекса ЛИРА-САПР. Контур поперечного сечения профилированного листа был сформирован из стержневых конечных элементов.

Для создания криволинейной поверхности ангара использовалась функция «создание поверхности при помощи вращения образующей». Образующей служила группа стержней, построенных в плоскости XOY и повторяющих упомянутый контур поперечного сечения профилированного листа арки. При построении очертания арки задавались точка, вокруг которой выполняется поворот образующей, количество элементов разбиения создаваемой поверхности и угол поворота. В результате была получена криволинейная поверхность с требуемыми геометрическими параметрами.

Далее с помощью функции «Жесткости и материалы» назначалась жесткость двух типов пластин для проектируемой арки. Первая пластина моделировала жесткость самого профилированного листа, вторая - жесткость элементов в местах соединения профилированных листов, то есть в зонах стыковки отдельных сегментов (рисунок 3.1).

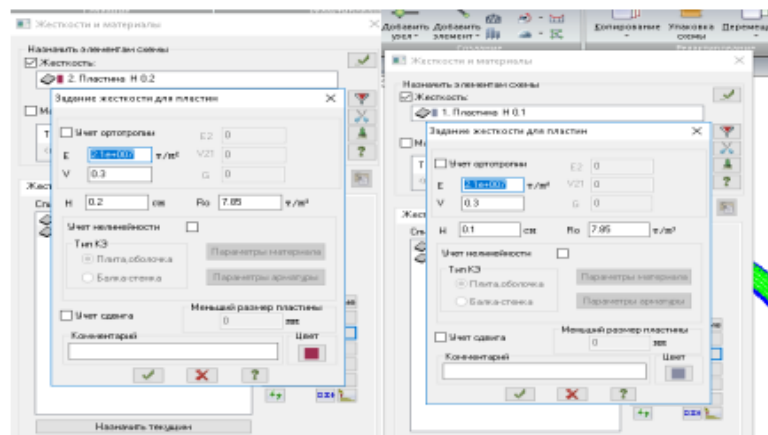
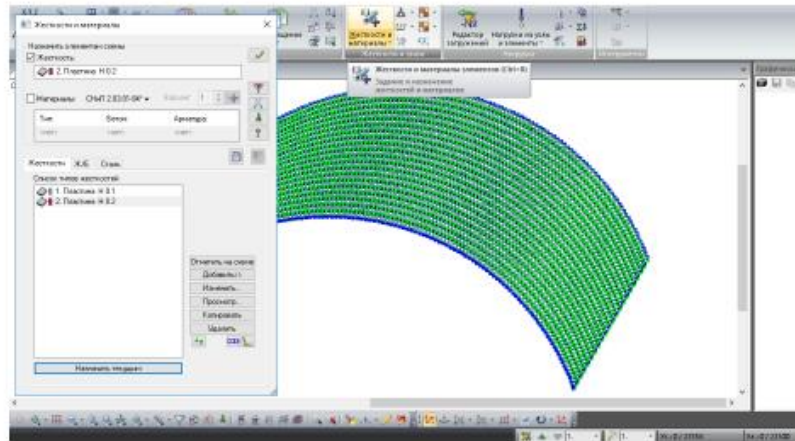


Рисунок 7 - Задание жесткости для двух пластин

Для загрузки конструкции нагрузками (собственный вес, снеговая и ветровая нагрузки) использовалась функция «Редактор загрузений».

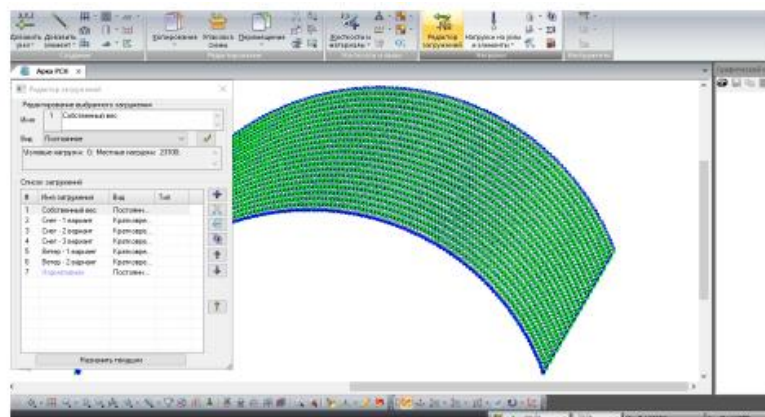


Рисунок 8 – Сбор нагрузок (1)

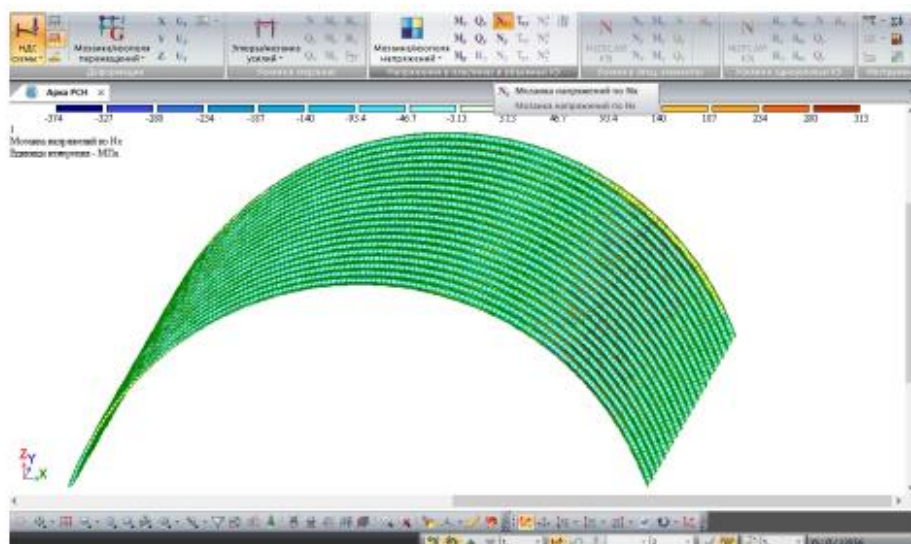


Рисунок 9 – Сбор нагрузок (2)

При помощи функции «Копирование» создается арка из 21 сегмента вдоль продольной оси.

При создании расчетной схемы моделировался фрагмент сооружения арки, при этом на границах модели задавались граничные условия, позволяющие имитировать работу конструкции. Сооружению разрешены перемещения вдоль поперечной оси (ось Z) и вертикальной оси (ось X), однако перемещение вдоль продольной оси (ось Y), обладающей наибольшей жесткостью, запрещено

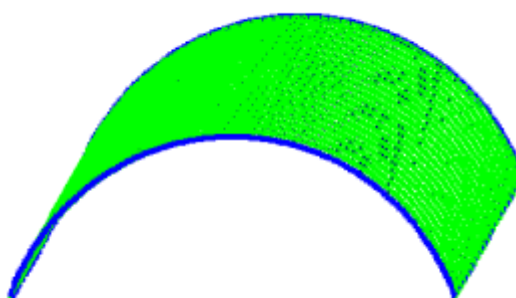
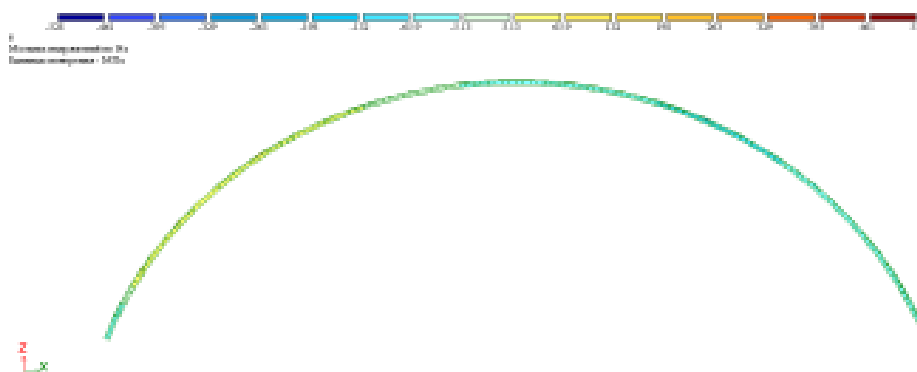


Рисунок 10 – Задание граничных условий

Оценка несущей способности конструкции производится на основе наиболее неблагоприятной комбинации нагрузок. Совместное воздействие нагрузок рассматривается в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» (расчетное сочетание нагрузок или расчетное сочетание усилий). На основе анализа результатов расчетов и данных таблиц РСН и РСУ

установлено, что наиболее неблагоприятным является сочетание, при котором конструкция ангара воспринимает, помимо собственного веса, снеговую и ветровую нагрузки, то есть совместное действие собственного веса, снеговой и ветровой нагрузок.

Анализ максимальных напряжений выполнен в соответствии с ГОСТ 14918-80 «Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий. Технические условия», раздел 3, пункт 3.10, таблица 16. Максимальный предел текучести оцинкованной стали составляет 230 МПа.



На примере ангара реализована параметрическая оптимизация сечения арки из условия минимума массы, позволившая снизить погонную массу на 16 % (переход от 35Ш2 к 30Ш2) при полном удовлетворении критериев прочности, устойчивости и жёсткости; коэффициент использования материала повышен с 0,79 до 0,92.

Для мостового пролётного строения с коробчатыми главными балками получены напряжения на уровне 152 МПа (запас 37 %), прогиб 60 мм ($L/1000$).

При создании нового файла расчёта назначен пятый признак схемы - шесть степеней свободы в каждом узле (три поступательных и три вращательных), что позволяет полностью учесть пространственную работу конструкции.

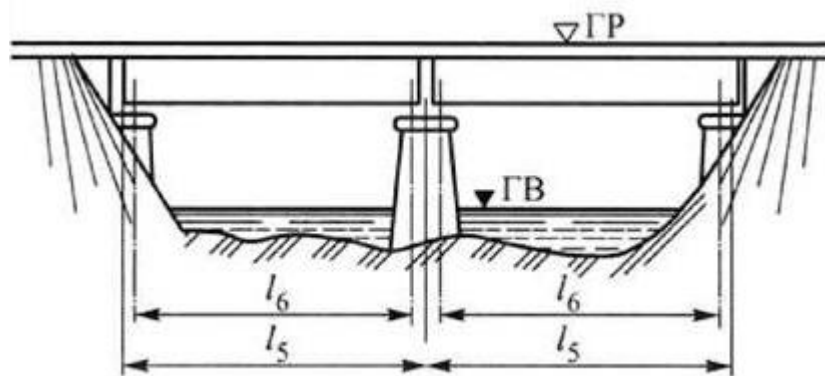


Рисунок 11- Схемы балочного разрезного моста

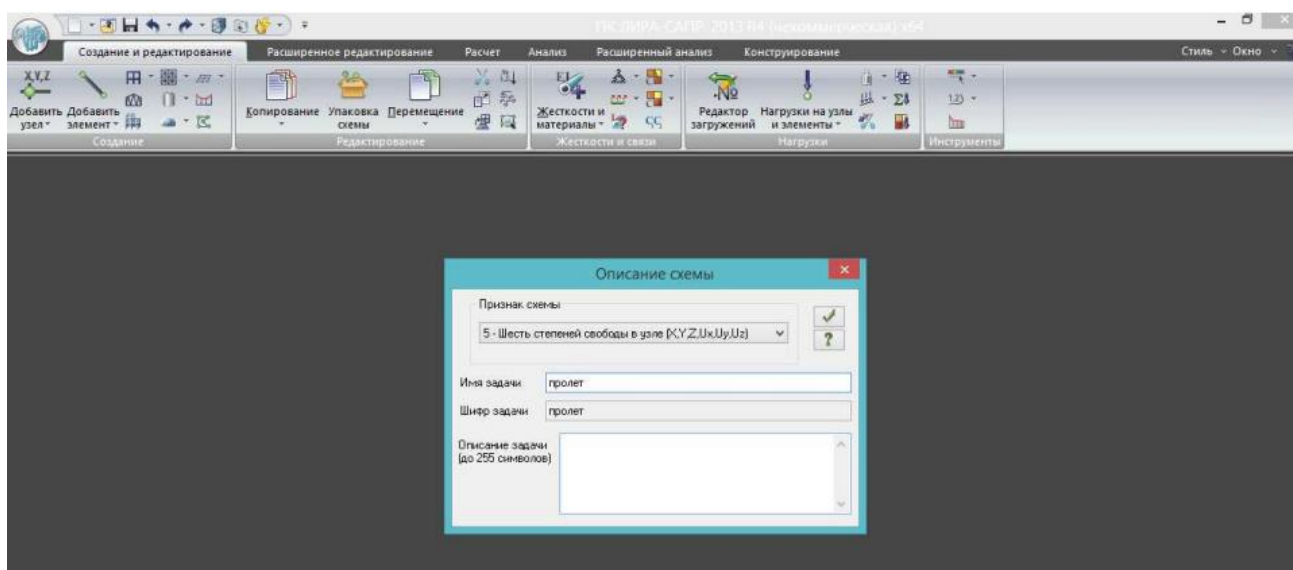


Рисунок 12 – Выбор признака схемы

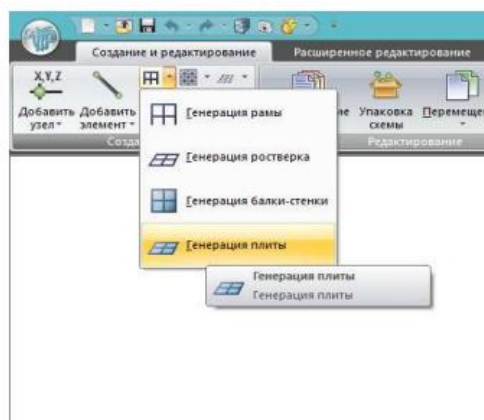


Рисунок 13 - Расчётная схема

Расчётная схема сформирована как комбинированная модель: главные и поперечные балки моделируются стержневыми конечными элементами, а ортотропная плита – пластинчатыми элементами (тип 41). Суммарное количество узлов составило около 1250, количество элементов – около 2100. Поперечное сечение главных балок задано по фактическим размерам (стенки

2500×16 мм, полки 600×25 мм; площадь сечения $A \approx 1100 \text{ см}^2$, момент инерции $I_x \approx 8,95 \cdot 10^6 \text{ см}^4$). Опираение принято шарнирно- неподвижным с одной стороны и шарнирно-подвижным – с другой.

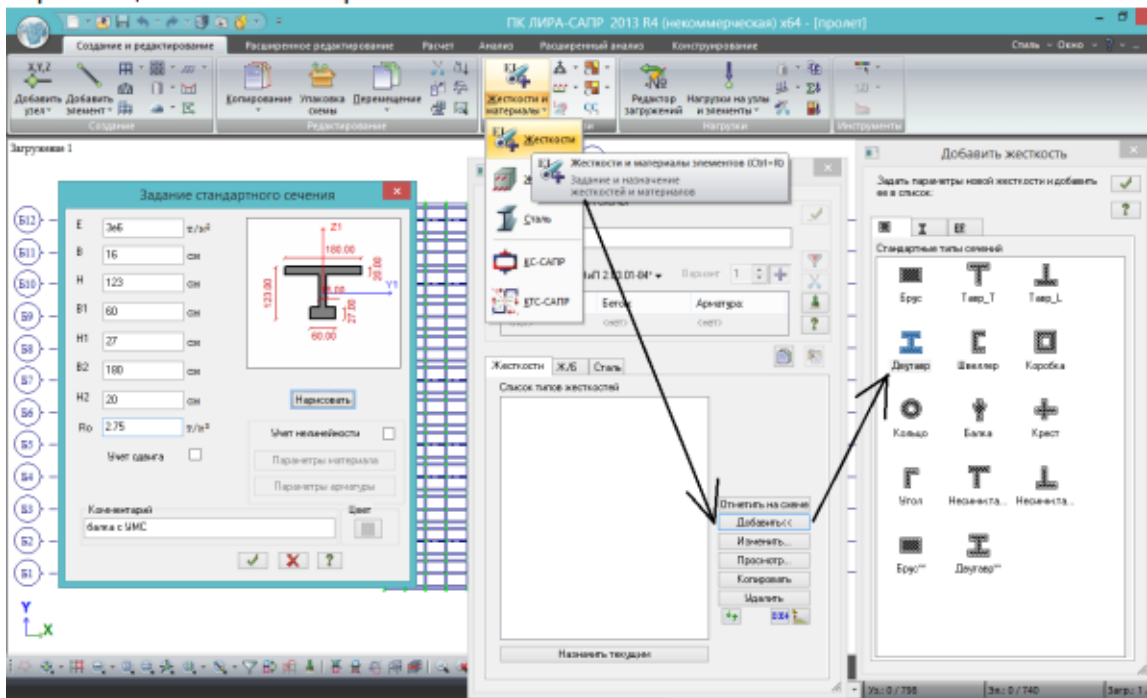


Рисунок 14 - Задание жесткостей и граничных условий

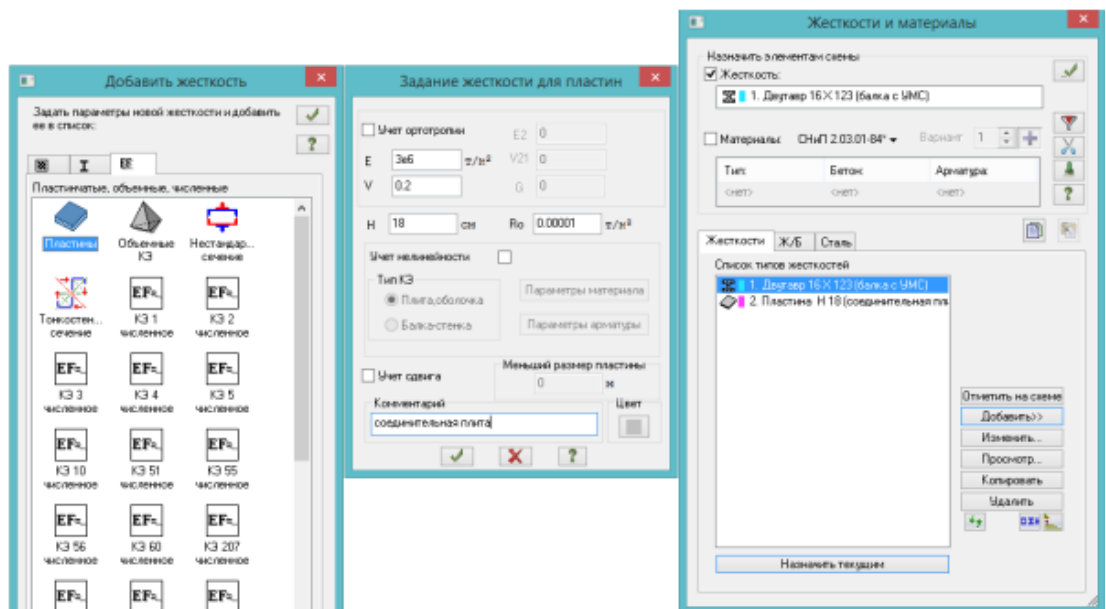


Рисунок 15 - Задание сечения

От автотранспортных средств - равномерно-распределенная нагрузка A11 (полосы АК): $q_{AK}=11q \text{ кН/м}$ пути на полосу движения. Одновременно

прикладывается тележка А11 с осевой нагрузкой $P=110$ кН. Коэффициент надежности $\gamma_f=1.5$, динамический коэффициент $1+\mu=1.31$ для пролета 60 м.

Установлено, что учёт вертикальной составляющей сейсмического воздействия увеличивает напряжения на 3–8 %, температурные деформации и усилия (до 136 МПа в бесшарнирной арке) также значимы и не могут игнорироваться. Сопоставление результатов численного моделирования и аналитических оценок подтвердило высокую сходимость (расхождение по усилиям не более 5 %). Полученные данные доказывают эффективность интегрированного применения Mathcad и LIRA-FEM при проектировании БМК и применимость предложенных алгоритмов расчёта и оптимизации для ангарных и мостовых сооружений.

Выводы по диссертации

Исследования магистерской диссертации на тему «Особенности проектирования большепролетных металлических конструкций» позволяют сделать следующие выводы:

1. На основе обобщения мирового и отечественного опыта систематизирована классификация БМК, включающая плоскостные и пространственные системы. Показано, что металлические каркасы снижают трудоёмкость изготовления до 50–80 %, монтажа до 25 % и стоимость до 24 % по сравнению с железобетоном, однако выбор оптимального типа конструкции является многокритериальной задачей, в которой экономия металла не является единственным определяющим фактором. Прямое копирование зарубежных проектных решений без учёта российских норм и местных климатических нагрузок недопустимо.

2. Определены основные нормативные требования (СП 16.13330, СП 20.13330, СП 14.13330, профильные ГОСТы) и специфические положения для БМК: запрет восстановленных труб, обязательная герметизация замкнутых профилей, а также необходимость учёта вертикальной сейсмической составляющей для пролётов от 24 м. Уточнены особенности расчёта вантовых систем (учёт геометрической нелинейности, поиск начальной формы) и пространственных рам (корректное моделирование жёсткости узловых сопряжений), определяющие достоверность распределения усилий.

3. Из рассмотренных методов оптимизации (параметрический, формообразующий, топологический) для практического проектирования БМК наиболее применим параметрический подбор сечений, реализованный в среде LIRA-FEM и позволяющий снизить массу конструкции на 8–12 % без нарушения нормативных требований. Параметрическая оптимизация, выполненная в рамках численных исследований, обеспечила снижение массы до 16 % по сравнению с традиционным подбором. Топологическая оптимизация даёт

принципиально новые формы, но требует последующей адаптации к условиям производства и сортаменту.

4. Для арочного ангара пролётом 36 м оптимальным по расходу стали признано двутавровое сечение 30Ш2 из стали С255 с запасом прочности 8 %, что соответствует максимальному использованию несущей способности. Для балочного моста пролётом 60 м коробчатое сечение высотой 2,5 м обеспечивает значительный резерв несущей способности (запас ~37 %), допустимый с учётом динамических эффектов и требований усталостной прочности.

5. Установлено, что для площадок сейсмичностью 7–9 баллов расчёт БМК необходимо выполнять динамическими методами с определением собственных частот и форм колебаний. Вертикальная сейсмическая составляющая увеличивает напряжения на 5–8 %, а температурный климатический перепад – до 15 % по сравнению с основным сочетанием нагрузок. Данные воздействия являются критичными для БМК и должны включаться в особые расчётные сочетания. Основные способы снижения температурных усилий – устройство температурных швов, применение податливых опорных частей и рациональный выбор статической схемы.

6. Сравнительный анализ программных комплексов показал, что LIRA-FEM и SCAD Office обладают необходимым функционалом для МКЭ-расчётов и проверок по СП. Для решаемых задач выбран комплекс LIRA-FEM в сочетании с Mathcad, что обеспечило преимущество при решении геометрически нелинейных задач и использовании специализированных конечных элементов для вант. Принцип суперпозиции нагрузок, допустимый для линейных задач, нарушается для вантовых покрытий и гибких арок, что требует анализа последовательности приложения нагрузок при формировании расчётных сочетаний.

7. Достоверность численного моделирования определяется в первую очередь квалификацией инженера: корректностью задания расчётной схемы, граничных условий, типов конечных элементов и интерпретацией ре-

зультатов. Полученные в работе результаты подтверждают, что реализованные методики параметрической оптимизации и учёта особых воздействий позволяют создавать рациональные, экономичные и безопасные конструкции большепролётных металлических сооружений.