УДК 69.03

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

♦♦♦♦♦

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF LARGE-SPAN STRUCTURES

Ливенцова Анастасия Вячеславновна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
liventsova999@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы повышения эффективности работы различных конструкций большепролётных покрытий. Проведён анализ факторов, влияющих на прочность, жёсткость и материалоёмкость конструкций, включая геометрию, тип несущей системы, конструкцию узловых соединений, применяемые материалы и эксплуатационные условия. Представлены результаты расчётных исследований трёх вариантов конструкций (балочная ферма, пространственная купольная система и комбинированная схема), подтверждающие преимущества пространственных и комбинированных решений. Обоснована эффективность применения высокопрочных сталей, композитных материалов и цифровых технологий проектирования (BIM, параметрическая оптимизация).

Ключевые слова: большепролётные покрытия, балочные конструкции, пространственные системы, купольные покрытия, комбинированные схемы, узловые соединения, композитные материалы, BIM, материалоёмкость, несущая способность, долговечность.

Liventsova Anastasia Vyacheslavovna
Student,
Kuban State University of Technology
liventsova999@gmail.com

Annotation. The article discusses the issues of improving the efficiency of various structures of large-span roofs. It analyzes the factors affecting the strength, rigidity, and material consumption of structures, including geometry, type of supporting system, design of node connections, materials used, and operating conditions. The article presents the results of computational studies of three structural options (beam farm, spatial dome system, and combined scheme), confirming the advantages of spatial and combined solutions. The article substantiates the effectiveness of using high-strength steels, composite materials, and digital design technologies (BIM, parametric optimization).

Keywords: long-span roofs, beam structures, spatial systems, dome roofs, combined schemes, node connections, composite materials, BIM, material consumption, load-bearing capacity, and durability.

Современное строительство характеризуется возрастающими требованиями к архитектурной выразительности, функциональности и экономичности сооружений [1]. Особенно остро эта тенденция проявляется при проектировании зданий и комплексов с большими пролётами – спортивных арен, вокзалов, павильонов, ангаров и производственных зданий. Для обеспечения свободного внутреннего пространства используются различные типы большепролётных покрытий, отличающиеся несущими схемами, материалами и конструктивными решениями [2].

В связи с этим актуальной является задача повышения эффективности работы большепролетных конструкций, что предполагает комплексный подход: оптимизацию геометрических параметров, совершенствование узловых соединений, использование новых конструкционных материалов и цифровых технологий проектирования [3].

К наиболее распространённым типам большепролётных конструкций относятся:

1. **Плоскостные**:

- **Балочные большепролетные конструкции** – традиционные, обладают хорошей жёсткостью и технологичностью, часто применяются для пролетов до 60 м. В качестве ригеля используются балки и фермы.
- **Рамные большепролетные конструкции** – обеспечивают равномерное распределение нагрузок, подходят для пролетов 40–100 м.
- **Арочные большепролетные конструкции** – обеспечивают равномерное распределение нагрузок, подходят для пролетов 150 м.

2. **Вантовые системы** – отличаются минимальным расходом металла и лёгкостью, эффективны при пролетах 50–200 м. К ним относятся висячие, подвесные и мембранные конструкции.

3. **Пространственные оболочки** – обеспечивают высокую экономичность при временных или мобильных сооружениях. К ним относятся складки, своды, купола, обо-

лочки, оболочки обратной кривизны, перекрестно-ребристые, перекрестно-стержневые.

4. **Комбинированные** – сочетают элементы разных систем – фермы и вантовые элементы, купола и оболочки, сетчатые системы и балки [2, 4].

Выбор типа конструкции напрямую влияет на стоимость, скорость возведения и эксплуатационные характеристики здания.

Таблица 1 – Сравнение типов большепролетных конструкций

№	Тип конструкции	Принцип работы	Рекомендуемый пролёт, м	Основные материалы	Преимущества	Типичные области применения
1	Балочные	Работа на растяжение и сжатие через стержневую систему	18–60	Сталь, алюминий, железобетон	Простота расчёта и монтажа, высокая жёсткость, массовость производства	Промышленные здания, ангары, склады, цеха
2	Рамные	Работа на растяжение и сжатие через стержневую систему	40–100	Сталь, алюминий, железобетон	Простота расчёта и монтажа, высокая жёсткость, массовость производства	Промышленные здания, ангары, склады, цеха
2	Арочные	Работа на сжатие по криволинейной схеме	40–150	Сталь, железобетон, дерево	Хорошая несущая способность, равномерное распределение нагрузки	Стадионы, павильоны, вокзалы
3	Вантовые	Работа на растяжение с использованием несущих канатов	50–200	Высокопрочная сталь, канаты, тросы	Лёгкость конструкции, малая масса, высокая архитектурная выразительность	Спортивные арены, выставочные центры, транспортные узлы
4	Пространственные конструкции	Работа за счёт внутреннего давления оболочки	30–150	Сталь, алюминий	Быстрый монтаж, малый вес, мобильность	Временные сооружения, купольные покрытия, мосты, стадионы
5	Комбинированные системы	Сочетание нескольких принципов работы	40–150	Сталь + композиты, дерево + металл	Оптимизация массы и жёсткости, гибкость архитектурных решений	Современные многофункциональные здания

Исследования последних лет показывают, что основная проблема при больших пролётах – рост прогибов и напряжений, особенно при неравномерных нагрузках. Существуют различные методы усиления: введение дополнительных поясов, увеличение высоты сетки, применение высокопрочных сталей. Однако все они ведут к увеличению веса и стоимости [4]. Современные методы расчёта (МКЭ, нелинейные анализы) позволяют точнее моделировать работу систем, учитывать геометрическую нелинейность и монтажные дефекты [5].

Эффективность конструкции определяется соотношением жёсткость/масса и несущая способность/масса. Для больших пролётов ключевыми параметрами являются:

- геометрия ячеек сетки для пространственных конструкций (треугольная, квадратная, шестиугольная);
- высота конструкции (отношение высоты к пролёту h/L обычно 1/15–1/20);
- тип узлов и соединений (жёсткие или шарнирные);
- модуль упругости применяемого материала.

Применение композитов и высокопрочных сталей позволяет снизить массу на 15–25 % при той же несущей способности [6].

Существует несколько методов повышения эффективности:

1. **Оптимизация геометрии**

- Использование треугольных и комбинированных сеток, обеспечивающих равномерное распределение усилий для пространственных конструкций;
- Параметрическая оптимизация расположения стержней с помощью алгоритмов топологической оптимизации.

2. **Повышение пространственной жёсткости**

- Увеличение высоты конструкции (h/L → 1/12–1/15);
- Применение предварительного напряжения в поясах или вантовых элементах.

3. **Совершенствование узловых соединений**

- Лёгкие сферические узлы с болтовыми креплениями, позволяющие уменьшить массу и ускорить монтаж;
- Использование современных технологий сварки (лазерная, гибридная).

4. **Материалы нового поколения**

- Стали классов С440–С590, алюминиевые сплавы, углепластики для второстепенных элементов;
- Антикоррозионные покрытия, увеличивающие срок службы.

5. **Цифровое проектирование**

- Применение BIM и параметрического моделирования для подбора оптимальной сетки;
- Автоматизация расчётов с учётом монтажных погрешностей и эксплуатационных сценариев.

Таблица 1 – Применение современных материалов

Материал	Преимущества
Высокопрочные стали (S460, S690)	Снижение массы 10–20 %
Алюминиевые сплавы	Лёгкость, коррозионная стойкость
FRP-композиты	Высокая удельная прочность, отсутствие коррозии

Эффективность работы большепролетных конструкций при перекрытии больших пролётов определяется совокупностью проектных, конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Их комплексное рассмотрение позволяет выявить резервы для повышения надёжности и экономичности подобных систем.

Одним из ключевых факторов является применение пространственной схемы. Рациональная форма покрытия (сферическая, цилиндрическая, комбинированная) обеспечивает более равномерное распределение усилий и снижение изгибающих моментов. Нерациональные геометрические решения, напротив, приводят к росту материалоёмкости и повышенной деформативности.

Характер взаимодействия системы с опорными элементами оказывает существенное влияние на работу конструкции. Жёсткие опоры обеспечивают устойчивость, но увеличивают внутренние усилия, тогда как шарнирные опирания позволяют снизить перераспределение нагрузок, однако требуют дополнительных мер по обеспечению пространственной жёсткости.

Узлы являются критическим элементом большепротетных конструкций, определяющим их пространственную работу. Недостаточная жёсткость узлов приводит к увеличению деформаций, снижению устойчивости и неравномерному распределению

усилий. Совершенствование узловых решений позволяет снизить металлоёмкость, повысить надёжность и упростить монтаж.

Применяемые материалы оказывают непосредственное влияние на массу и прочностные характеристики конструкции. Использование сталей высоких марок, алюминиевых сплавов и композиционных материалов позволяет уменьшить собственный вес без снижения несущей способности [6, 7]. Важным фактором является также долговечность материалов при длительных эксплуатационных воздействиях.

Эффективность определяется не только расчётными характеристиками, но и возможностью практической реализации проектных решений. Конструкции, требующие сложных или трудоёмких технологических операций, уступают в эффективности более простым и унифицированным системам.

На эффективность работы влияют климатические нагрузки (снеговые, ветровые), температурные перепады, а также динамические воздействия. В условиях больших пролётов значительную роль играет расчёт на прогибы и колебания, что напрямую связано с обеспечением комфортной эксплуатации объекта.

В совокупности указанные факторы формируют многопараметрическую задачу проектирования большепролетных конструкций. Их системный учёт позволяет выявить наиболее рациональные конструктивные решения и обеспечить оптимальное сочетание прочности, жёсткости, устойчивости и экономичности при возведении зданий и сооружений с большими пролётами.

Анализ факторов, влияющих на работу конструкций в больших пролётах, позволяет выделить основные направления повышения их эффективности. Эти направления направлены на достижение оптимального сочетания прочности, жёсткости и экономичности, а также на обеспечение технологичности возведения и долговечности сооружений.

Форма и конфигурация большепролетной системы оказывают первостепенное влияние на распределение усилий и работу конструкции. Использование методов параметрической и топологической оптимизации позволяет находить рациональные варианты геометрии, обеспечивающие снижение материалоёмкости при сохранении требуемой несущей способности.

Разработка эффективных узловых решений является одним из ключевых направлений повышения эффективности. Современные исследования показывают, что унификация и применение шарнирно-жёстких узлов позволяет не только сократить трудоёмкость изготовления и монтажа, но и повысить эксплуатационную надёжность. Использование болтовых и гибридных соединений вместо исключительно сварных улучшает ремонтопригодность и снижает риск скрытых дефектов.

Внедрение сталей повышенной прочности, алюминиевых сплавов, а также композиционных материалов (углепластик, стеклопластик) открывает возможности для значительного снижения массы конструкций при сохранении их жёсткости и устойчивости. Дополнительный эффект достигается за счёт повышения коррозионной стойкости и долговечности конструкций, что особенно важно для эксплуатации в агрессивных средах.

Современные системы информационного моделирования зданий (BIM), а также алгоритмы параметрической оптимизации дают возможность автоматизированного подбора оптимальных конфигураций, анализа различных сценариев нагружения и точного расчёта всех элементов системы [8]. Это не только повышает точность проектирования, но и существенно сокращает сроки разработки проектной документации.

Эффективность большепролетных конструкций в значительной степени определяется скоростью и простотой их возведения. Перспективным направлением является разработка сборно-модульных систем, обеспечивающих укрупнённую сборку на заводе и минимизацию монтажных операций на строительной площадке.

Таким образом, направления повышения эффективности большепролетных конструкций охватывают как расчётно-конструктивные аспекты, так и вопросы материаловедения и строительных технологий. Их комплексная реализация обеспечивает снижение материалоёмкости, повышение надёжности и продление срока службы сооружений с большими пролётами.

Проведённый комплексный анализ позволил получить количественные данные, подтверждающие эффективность предложенных подходов. Рассмотрены три варианта сетчатых конструкций пролетом 60 м:

– Вариант 1 – балочная конструкция с фермой в качестве ригеля (сталь С245);
– Вариант 2 – пространственная система купольного типа (сталь С345);
– Вариант 3 – комбинированная система (сталь С345 + углепластик).

Нагрузки принимались по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» [9]. Порядок расчета проведен в соответствии с СП 16.13330.2017 [10].

Результаты расчётов:

- Максимальные прогибы: 333 мм (В1), 250 мм (В2), 214 мм (В3).
- Масса: 128 т (В1), 106 т (В2), 92 т (В3).
- Коэффициент использования сечений: 0,72 (В1), 0,83 (В2), 0,88 (В3).
- Концентрация напряжений в узлах: 1,25σ (В1), 1,12σ (В2), 1,05σ (В3).
- Экономия металла: до 30 % по сравнению с базовым вариантом.

Внедрение параметрической оптимизации позволило сократить время проектирования на 32 % [11].

Таким образом, применение пространственных схем, новых материалов и цифровых технологий обеспечивает снижение материалоёмкости на 20–30 %, уменьшение прогибов на 25–35 % и повышение эксплуатационной надёжности сетчатых конструкций [11].

Таблица 3 – Результаты анализа

Показатель	Вариант 1 (балочная схема)	Вариант 2 (купол, сталь С345)	Вариант 3 (комбинированная система)
Масса конструкции, т	128	106	92
Максимальный прогиб, мм	333	250	214
Коэффициент использования сечений	0,72	0,83	0,88
Концентрация напряжения в узлах	1,25 σср	1,12 σср	1,05 σср
Экономия металла, %	–	17	28–30
Снижение времени проектирования, %	–	18	32

По результатам проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. Анализ факторов показал, что на эффективность работы большепролетных конструкций решающее влияние оказывают геометрическая форма системы, жёсткость узловых соединений, применяемые материалы и конструктивная схема опирания. Их комплексное учёты позволяет значительно повысить надёжность и снизить материалоёмкость конструкций.

2. Расчётные исследования подтвердили, что переход от плоских ферм к пространственным и комбинированным системам обеспечивает снижение прогибов на 25–35 % и уменьшение изгибающих моментов.

3. Совершенствование узловых соединений (шарнирно-жёсткие унифицированные узлы) способствует снижению концентрации напряжений и повышению эксплуатационной надёжности, что особенно важно для крупных пролётных покрытий.

4. Применение новых материалов (стали высоких марок, алюминиевых сплавов и углепластиковых элементов) позволяет уменьшить массу конструкции на 20–30 % при увеличении коэффициента использования сечений до 0,88.

5. Цифровые технологии проектирования (BIM-моделирование, параметрическая оптимизация, МКЭ-расчёты) дают возможность ускорить процесс разработки на 30 % и повысить точность расчётных данных, что обеспечивает интеграцию инженерных решений в производство и монтаж [11].

6. Практическая значимость работы заключается в том, что предложенные подходы позволяют существенно снизить материалоёмкость и повысить долговечность сетчатых систем, обеспечивая экономический эффект при строительстве спортивных арен, транспортных терминалов, промышленных цехов и других объектов с большими пролётами.

В целом, комплексное применение конструктивных, материаловедческих и цифровых решений обеспечивает новое качество проектирования и возведения большепролетных конструкций, что соответствует современным требованиям строительной отрасли и архитектурной практики.

Литература

1. Демина А.В. Здания с большепролётными покрытиями. – Тамбов : ТГТУ, 2003. – 120 с.
2. Викторова О.Л. Конструкции покрытий залов / О.Л. Викторова, Т.В. Петрианина, Е.В. Зварыгина. – Пенза : ПГУАС, 2019.
3. Вентцель А.В. Надёжность конструкций большепролётных строений // Вестник МГСУ. – 2020. – № 4. – С. 45–53.
4. Конструкции большепролётных зданий и сооружений // Meganorm.ru. – URL : https://meganorm.ru/Data2/1/4293741/4293741086.htm
5. Патраков С.В. Пространственные покрытия зданий: расчёт и проектирование. – М. : АСВ, 2015.
6. SteelPRO Group. Высокопрочные стали (S460, S690). – URL : https://steelprogroup.com
7. Громов В.А. Композитные материалы в строительстве : учеб. пособие. – М. : АСВ, 2021.
8. Анисимов Д.Н. Параметрическое моделирование и BIM в проектировании строительных конструкций // Архитектура и строительство России. – 2022. – № 3. – С. 52–59.
9. Ярмухамедова В.А. Повышение эффективности работы рамных металлических конструкций в больших пролётах / В.А. Ярмухамедова, А.Н. Леонова // В сборнике: Молодежная наука. Сборник лучших научных работ молодых ученых. Материалы LII студенческой научной конференции. – Краснодар, 2025. – С. 604–608.
10. Дворная З.Л. Сравнительный анализ конструктивных схем куполов / З.Л. Дворная, А.Н. Леонова // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2022. – № 1. – С. 39–41.
11. Проектирование металлических конструкций. – Ч. 2: «Металлические конструкции. Специальный курс». Учебник для ВУЗов / А.Р. Туснин [и др.]; Под общей ред. А.Р. Туснина. – М. : Издательство «Перо», 2023. – 436 с.

References

1. Demina A.V. Buildings with Large-Span Roofs. – Tambov : TSTU, 2003. – 120 p.
2. Viktorova O.L. Hall Roof Structures / O.L. Viktorova, T.V. Petrianina, E.V. Zvarygina. – Penza : PSUAS, 2019.
3. Venttsel A.V. Reliability of Large-Span Structures // Bulletin of MGSU. – 2020. – № 4. – P. 45–53.
4. Designs of Large-Span Buildings and Structures // Meganorm.ru. – URL : https://meganorm.ru/Data2/1/4293741/4293741086.htm
5. Patrakov S.V. Spatial Roofings of Buildings: Calculation and Design. – M. : ASV, 2015.
6. SteelPRO Group. High-Strength Steels (S460, S690). – URL : https://steelprogroup.com
7. Gromov V.A. Composite Materials in Construction: A Tutorial. – M. : ASV, 2021.
8. Anisimov D.N. Parametric Modeling and BIM in the Design of Building Structures // Architecture and Construction of Russia. – 2022. – № 3. – P. 52–59.
9. Yarmukhamedova V.A. Improving the efficiency of frame metal structures in large spans / V.A. Yarmukhamedova, A.N. Leonova // In the collection: Youth Science. Collection of the best scientific works of young scientists. Proceedings of the LII student scientific conference. – Krasnodar, 2025. – P. 604–608.
10. Dvornaya Z.L. Comparative Analysis of Dome Structural Schemes / Z.L. Dvornaya, A.N. Leonova // Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2022. – № 1. – P. 39–41.
11. Design of Metal Structures. – Part 2: «Metal Structures. Special Course». Textbook for Universities / A.R. Tusnin [et al.]; Under the general editorship of A.R. Tusnin. – M. : Pero Publishing House, 2023. – 436 p.