

Особенности разработки организационно-технологических решений при производстве строительно-монтажных работ крыш большепролетных зданий

Татьяна Константиновна Кузьмина , Антон Николаевич Большаков , Надежда Алексеевна Лукьянова* ,
Анастасия Вячеславовна Пузикова 

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: galcevanadezda@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В современной строительной отрасли вантовые конструкции занимают особое место благодаря своим уникальным характеристикам и широким возможностям применения. Они позволяют создавать архитектурно выразительные здания с большими пролетами, обеспечивая высокую экономичность и минимальный вес конструкций. Особый интерес вызывают системы с перекрестным расположением вант и арочно-вантовые комбинированные решения, включая «tensegrity»-структуры. **Материалы и методы.** Исследование основывается на анализе нормативных документов, научно-технической литературы, отражающих монтаж вантовых покрытий, включая особенности применения различных материалов, в том числе произведенных с применением нанотехнологий, требования к качеству материалов, технологические процессы установки и контроль надежности конструкций. Проведен сравнительный анализ различных типов вантовых систем (параллельное, радиальное и перекрестное расположение вант), а также рассмотрены примеры их практического применения. **Результаты и обсуждения.** На основе анализа нормативных документов и научно-технической литературы сформирована классификация вантовых покрытий по различным категориям, отражающим их конструктивные особенности и области применения. Проанализированы преимущества и недостатки каждого типа вантовых покрытий, выявлены прогрессивные методы монтажа вантовых покрытий. **Заключение.** Использование вантовых покрытий, особенно с перекрестным расположением вант включая «tensegrity»-структуры, является перспективным направлением в современном строительстве. Данные типы конструкций позволяют создавать сложные архитектурные решения, создавая лёгкие, эстетически привлекательные покрытия. В то же время проектирование и монтаж вантовых конструкций требуют учета всех их недостатков и ограничений для обеспечения прочности и долговечности зданий и сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вантовые покрытия, монтаж вантовых покрытий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Для цитирования: Кузьмина Т.К., Большаков А.Н., Лукьянова Н.А., Пузикова А.В. Особенности разработки организационно-технологических решений при производстве строительно-монтажных работ крыш большепролетных зданий. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(3):339–346. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-339-346>. – EDN: YWYQQO.

Features of organizational and technological solutions for the construction and installation of large-span buildings

Tatyana K. Kuzmina , Anton N. Bolshakov , Nadezhda A. Lukyanova* , Anastasiya V. Puzikova 

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

* Corresponding author: e-mail: galcevanadezda@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Cable-stayed structures occupy a special place in the modern construction industry due to their unique characteristics and wide application possibilities. They allow to convey architectural expression of large span buildings and to ensure high efficiency and minimal weight of structures. Systems with cross arranged cables and arch cable-stayed combined solutions, including "tensegrity" structures, are of particular interest nowadays. **Materials and methods.** The study is based on an analysis of regulatory documents, scientific and technical literature reflecting the installation of cable-stayed structures, including requirements for the quality of materials, installation processes and structural reliability control. A comparative analysis of various types of cable-stayed systems (parallel, radial and cross arranged) is carried out, and examples of their practical application are considered. **Results and discussion.** Based on the analysis of regulatory documents and scientific and technical literature review, cable-stayed structures were classified into various categories, reflecting their design features and applications. The advantages and disadvantages of each type of cable-stayed coverings were analyzed as well as progressive methods of installations were revealed. **Conclusion.** The use of cable-stayed coverings, especially with cross-arranged cables and "tensegrity" structures are a promising direction in modern construction. These structures allow to create complex architectural solutions, creating lightweight, aesthetically attractive coverings. At the same time, the design and installation of cable-stayed structures require consideration of all their disadvantages and limitations to ensure the strength and durability of buildings and structures.

KEYWORDS: cable-stayed coverings, installation of cable-stayed coverings

FOR CITATION:

Kuzmina T.K., Bolshakov A.N., Lukyanova N.A., Puzikova A.V. Features of organizational and technological solutions for the construction and installation of large-span buildings. *Nanotechnologies in construction*. 2025;17(3):339–346. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-339-346>. – EDN: YWYQOQ.

ВВЕДЕНИЕ

В современной строительной отрасли вантовые конструкции выделяются благодаря своим исключительным характеристикам и широким возможностям применения. Эти системы состоят из гибких стальных элементов — вант, которые работают на растяжение, а также из опорных конструкций, воспринимающих нагрузки от этих элементов. Ванты могут быть выполнены в виде тросов, канатов или пучков высокопрочной проволоки. Такие конструкции являются важным инструментом в развитии архитектурных решений, позволяя создавать здания со сложными объемно-пространственными формами, а также большие пролетные сооружения. Они являются эффективным решением для большепролетных зданий и сооружений [1], в том числе активно используются при возведении торговых центров, выставочных залов, спортивных комплексов, а также промышленных объектов, обеспечивая надежность и экономичность при перекрытии значительных пространств. Их широкое применение объясняется способностью эффективно использовать несущие свойства материалов, обеспечивая минимальный вес конструкции и высокую экономичность. Вантовые покрытия представляют собой одну из ключевых разновидностей пространственных конструкций, которые наиболее точно отражают тектонику сооружения [2]. Их главное преимущество перед жесткими аналогами заключается в минимальном весе на квадратный метр перекрываемой площади, а также в наиболее рациональном использовании металла — основного

конструкционного материала. Висячих покрытиях металлические элементы функционируют исключительно на растяжение, что позволяет полностью задействовать их прочностные характеристики. Это делает вантовые системы не только экономичными, но и высокоэффективными с точки зрения распределения нагрузок. По мнению Долгополова В.Е. и его коллег, «рациональное использование материалов в вантовых конструкциях обеспечивает снижение затрат на материалы и монтаж, что особенно важно для уникальных сооружений» [3].

Наибольший интерес в последнее время как в России, так и за рубежом вызывают покрытия с перекрестным расположением вант, а также арочно-вантовые комбинированные системы. Эти конструкции активно развиваются и считаются одними из наиболее прогрессивных решений в современном строительстве. Их использование открывает широкие возможности для создания легких, экономически эффективных и архитектурно выразительных покрытий. Комбинированные вантовые конструкции включают в себя обширную группу систем, известных как «tensegrity» [4]. В таких системах непрерывные растянутые ванты сочетаются с короткими и немногочисленными распорками. Как отмечается в исследовании Habibi T. и соавторов, «предварительное напряжение является ключевым фактором, обеспечивающим устойчивость и эффективность работы tensegrity-структур» [5]. Одной из разновидностей «tensegrity»-систем являются вантовые фермы, которые состоят из высокопрочных поясов (гибких вант) и вертикальных связей. Для обеспече-

ния устойчивости вантовых поясов при воздействии знакопеременных внешних нагрузок используется предварительное напряжение. Еремеев П.Г. подчеркивает, что «системы «тенсегрители» открывают новые горизонты в архитектурном проектировании, позволяя создавать легкие и экономически эффективные конструкции» [6].

Также в настоящее время активно обсуждаются инновационные технологии строительства уникальных зданий и сооружений с целью повышения производительности в строительной отрасли.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Монтаж вантовых покрытий охватывается комплексом нормативных документов, которые регламентируют как общие требования к строительству, так и специфические особенности работы с высоконапряженными элементами. Ключевыми направлениями нормирования являются:

Требования к качеству материалов и изделий.

Технологические процессы монтажа.

Проверка прочности и надежности конструкций после установки.

Безопасность работ при выполнении монтажных операций.

Основные документы, регламентирующие эти аспекты, включают:

СНиП 3.03.01-87 «Несущие и ограждающие конструкции» — устанавливает общие требования к качеству сборки и монтажа строительных конструкций, включая вантовые системы.

СП 64.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» — содержит методики расчета нагрузок, которые необходимо учитывать при проектировании и монтаже вантовых покрытий.

ГОСТ Р 52969-2008 «Стальные конструкции. Методы контроля качества сварных соединений» — определяет требования к контролю качества сварных соединений, которые часто используются в вантовых системах.

Качество используемых материалов напрямую влияет на долговечность и надежность вантовых покрытий. Монтаж вантовых покрытий является сложным технологическим процессом, требующим точного соблюдения последовательности операций и параметров натяжения. После завершения монтажа вантовых покрытий необходимо провести комплекс проверок для подтверждения их надежности и соответствия проектным параметрам. Безопасность при монтаже вантовых покрытий имеет первостепенное значение из-за высотных работ и использования высоконапряженных элементов.

Нормативная база в области монтажа вантовых покрытий достаточно обширна и охватывает все этапы

работ, от выбора материалов до завершающих испытаний. Строгое соблюдение этих норм позволяет обеспечить высокое качество монтажа, долговечность конструкций и безопасность эксплуатации объектов. При этом важно отметить, что развитие технологий и появление новых материалов требуют постоянного совершенствования существующих нормативных документов, а также разработки дополнительных стандартов для учета специфики современных решений.

На основе проведенного анализа, в том числе нормативных материалов, можно выделить ряд неоспоримых преимуществ вантовых систем по сравнению с традиционными стальными конструкциями:

Малый вес конструкции: Благодаря использованию высокопрочных сталей и эффективному распределению нагрузок в растянутых элементах ванты полностью задействуют свою площадь сечения, что значительно снижает общий вес конструкции.

Упрощение монтажа: в большинстве случаев при установке вантовых покрытий не требуется использование лесов или подмостей, что сокращает трудоемкость и ускоряет процесс строительства.

Транспортабельность: благодаря возможности сворачивания вантов в компактные бухты их транспортировка становится значительно проще и менее затратной, что существенно облегчает доставку на строительные площадки.

Возможность перекрытия больших пролетов: вантовые системы позволяют реализовывать конструкции с большими пролетами, исключая необходимость использования промежуточных опор, что особенно актуально для объектов с открытыми пространствами.

Экономическая целесообразность: по мере увеличения длины пролета данные конструкции становятся все более выгодными с финансовой точки зрения, поскольку масса несущих элементов остается минимальной, что снижает общие затраты на материалы.

Эстетическая выразительность: уникальная геометрия вантовых конструкций придает зданиям современный, динамичный и эстетически привлекательный облик, делая их настоящим украшением любого ландшафта или городской среды.

Комфорт внутреннего пространства здания: вантовые покрытия улучшают акустические характеристики помещений, могут повышать уровень естественного освещения и расширять зоны видимости.

Прочность и долговечность: вантовые конструкции обеспечивают стабильную работу конструкций длительный период времени под воздействием высоких нагрузок и внешних факторов.

Стоит также выделить недостатки вантовых конструкций:

Высокая деформативность: является основным недостатком данного типа конструкций. При проек-

тировании необходимо разрабатывать дополнительные решения для повышения жесткости вантовых конструкций, для корректировки деформативности.

Повышение стоимости строительства: необходимость применения вантовых конструкций ведет к росту бюджета проекта за счет использования специальных опорных конструкций и строительных материалов.

Сложность в организации водоотвода: при проектировании систем водоотвода необходимо разрабатывать дополнительные решения для эффективного оттока воды, учитывая геометрию вантовых конструкций [7].

Производство вант является сложным технологическим процессом. При этом использование конструктивных решений с длинными горизонтальными или слабо наклонными вантами оказывается неоптимальным, поскольку конструкции могут значительно увеличивать деформации и ухудшать общую эффективность системы. Таким образом, проектирование и эксплуатация таких систем требуют особого внимания к деталям для обеспечения их надежности и долговечности [8].

Низкая материалоемкость конструктивных элементов вантовых покрытий обосновывается тем, что они работают в основном на растяжение. В данных конструкциях решена проблема устойчивости сжатых элементов — они могут быть массивны и несут максимум нагрузки, собираемой по большой площади, что позволяет использовать материал наиболее эффективно. Современные методы строительства предполагают возможность усовершенствования вантовых кровель в части применения для них тросов-вант, выполненных не из стали, а из углеродных волокон. Углеродные материалы обладают малым весом при высоком уровне прочности и жесткости, жаропрочностью и стойкостью к коррозии. В качестве непосредственно ограждающего материала предполагается водоотталкивающий брезент. Такое покрытие может быть собрано как паруса на парусном корабле и развернуто в проектное положение при жаркой или дождливой погоде.

При проектировании и строительстве конструкций существенную роль играет выбор материала — бетона. От него будет зависеть прочность, надежность конструкций и сооружения в целом [9, 10]. При строительстве с применением вантовых конструкций могут быть использованы модифицированные виды бетона, например высокопрочный легкий бетонов для оптимизации расхода арматурной стали и бетона или керамзитобетон марки по средней плотности D1500-D1700, класса по прочности B25-B30 с использованием керамзитового гравия и модифицирующих добавок, с использованием недорогого сырья получены легкие бетоны, изготовленные

из высокоподвижных смесей с маркой по осадке конуса П4-П5, которые эффективно применять в строительстве [11]. Дополнительный экономический эффект достигается благодаря меньшим показателям коэффициента теплопроводности, а также уменьшением затрат при эксплуатации здания [12, 13]. Стоит отметить, что в данное время быстро развивающееся направление нанотехнологий не оставило без внимания и отрасль строительства. Непрерывно появляются новые материалы с запредельными и иногда противоречащими показателями. Так, впервые российскими учеными Пономаревым А.Н. и Юдовичем М.Е. был создан легкий нанобетон. Это обычный бетон на основе бетона B25 с добавлением комплексной добавки, включающей компоненты, обработанные с помощью нанотехнологий. Прочность нанобетона — 45–60 МПа, удельный вес — 1,4–1,6 т/м³, морозостойкость — W20 [14].

Для обеспечения долговечности и надежности конструкций, поскольку ванты (гибкие тросовые элементы) подвержены воздействию атмосферной коррозии, особенно в условиях высокой влажности, солевых отложений и перепадов температур используют ингибиторы коррозии, содержащие синергетические нанодобавки. Ведущее место среди ингибиторов коррозии занимают гетероциклические соединения, а именно азотсодержащие соединения, в частности, производные имидазолинов [15, 16].

Таким образом, вантовые конструкции представляют собой современное и эффективное решение для строительства масштабных объектов, однако их применение требует тщательного учета всех особенностей и возможных ограничений [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вантовые конструкции можно классифицировать по различным параметрам. Однако, принимая во внимание, что архитектурно-пространственная организация зданий с такими конструкциями определяется как формой самого покрытия, так и особенностями опорного контура, наиболее логичным кажется их разделение именно по этим двум ключевым характеристикам [18]. Такой подход позволяет более точно описать и систематизировать особенности данных конструкций в зависимости от их архитектурно-строительных решений [19]. На основании изученных материалов была составлена схема, представляющая собой классификацию вантовых покрытий по различным признакам, которые определяют их конструктивные особенности и области применения (рис. 1). Классификация включает несколько основных категорий, каждая из которых раскрывает конкретный аспект проектирования и реализации таких конструкций.

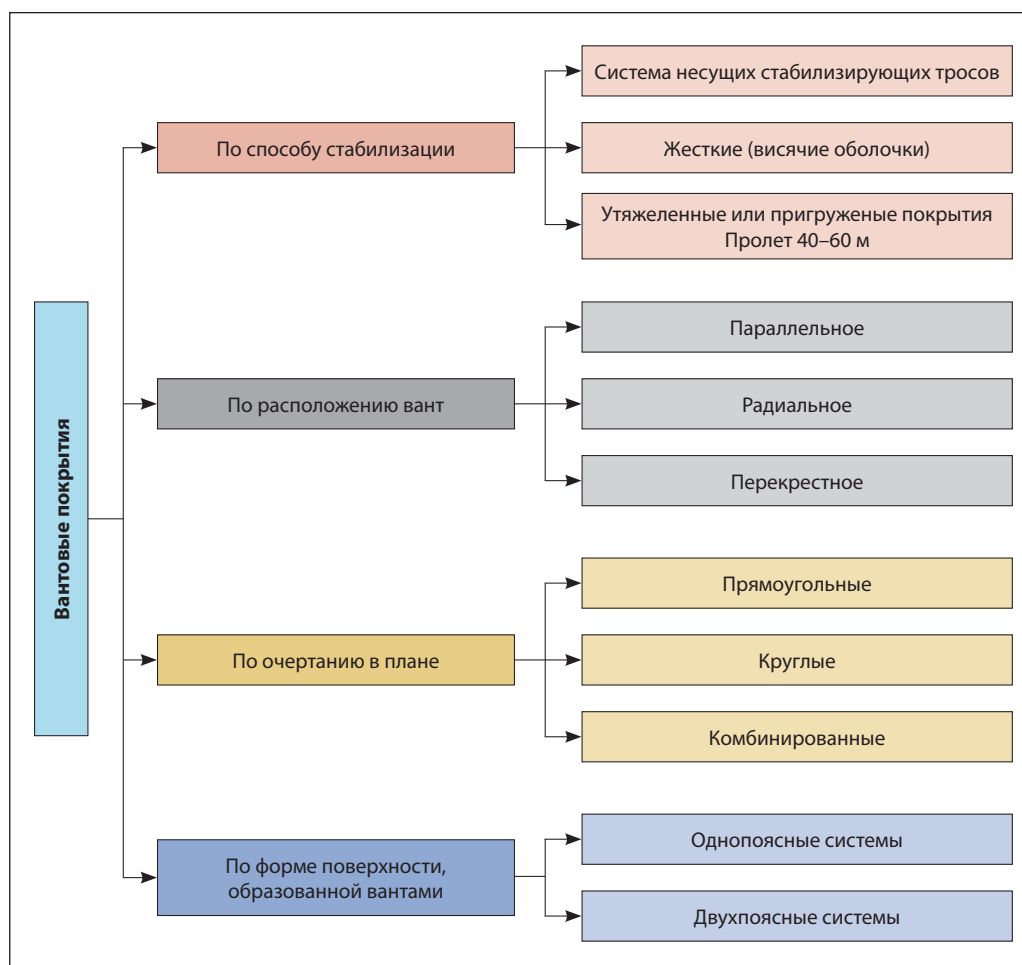


Рис. 1. Классификация вантовых конструкций

Проведен сравнительный анализ характеристик вантовых покрытий, классифицированных по расположению вант, и представлен в табл. 1.

Анализ основных характеристик вантовых покрытий в зависимости от расположения вант позволяет сделать вывод, что каждый тип таких конструкций обладает своими достоинствами и недостатками. В то же время конструкции с перекрестным расположением вант, а также арочно-вантовыми комбинированными системами активно совершенствуются и признаются одними из самых передовых в современной строительной отрасли. Применение таких технологий позволяет воплощать легкие, экономичные и в то же время эстетически привлекательные конструкции кровель.

Комбинированные вантовые конструкции охватывают широкий класс систем, которые принято называть «тенсегрити» («tensegrity»). В этих системах натянутые ванты, образующие непрерывную систему, дополняются короткими и относительно редкими опорными элементами — распорками. К типам «тенсегрити»-структур относятся вантовые фермы, состоящие из прочных гибких поясов, выполненных из высоконапряженных вант, и вертикальных связей.

Чтобы обеспечить устойчивость вантовых поясов при переменных внешних нагрузках, применяется предварительное напряжение данных элементов.

К достоинствам тенсегрити-систем можно отнести следующие особенности:

Низкий собственный вес конструкций.

Минимальные распорные усилия, передаваемые на нижележащие элементы.

Высокую жесткость при асимметричных нагрузках.

Хорошую сопротивляемость динамическим воздействиям, включая сейсмические, благодаря встроенным демпфирующим свойствам системы.

Возможность создания конструкций, которые визуально воспринимаются как легкие и прозрачные.

Вместе с тем, для данных систем характерны повышенные требования к точности: необходимо строго выдерживать геометрию элементов, контролировать уровень предварительного напряжения и качество соединений узлов. Эти факторы требуют особого внимания на этапах проектирования и монтажа [20].

Рассмотрим примеры применения «тенсегрити»-структур:

Стадион Mercedes-Benz Stadium (Атланта, США). Этот современный стадион использует элементы

Таблица 1. Сравнение типов вантового покрытия

Тип вантового покрытия	Характеристики конструкции	Преимущества	Недостатки	Примеры
Покрытия с параллельным расположением вант	Конструкция висячей оболочки состоит из системы параллельных вант, которые закрепляются на незамкнутом контуре. В качестве такого контура может выступать железобетонная или стальная балка, а также каркас пристройки. Это решение обеспечивает устойчивость и эффективное распределение нагрузок, делая висячие оболочки популярным выбором для различных строительных проектов.	– Простота в конструктивном исполнении; – Возможность оптимизации пространства за счет уменьшения стрелы провисания.	Увеличение усилий в вантах и опорных конструкциях приводит к большему расходу материалов, что требует тщательного проектирования для баланса прочности и экономичности.	Ангары в аэропортах Франкфурта-на-Майне и Фьюмичино, где покрытия выполнены в виде оболочек с параллельным расположением вант.
Покрытия с радиальным расположением вант	Радиальные системы нитей находят применение преимущественно в зданиях круглой формы, а реже – эллиптической. В этих конструкциях для фиксации нитей используются два контура: наружное и внутреннее опорные кольца. Радиально расположенные нити, размещенные на равном удалении друг от друга, служат основой для укладки трапециевидных железобетонных плит, которые в дальнейшем замоноличиваются для создания единой прочной конструкции. При этом расстояние между нитями по периметру покрытия определяется методом вариантного проектирования с учетом ряда факторов. Оно должно быть кратно шагу колонн, обеспечивающих поддержку всей конструкции, что обеспечивает оптимальное распределение нагрузок и стабильность системы.	– Практически безизгибная работа пролетных элементов, обеспечивающая экономичность и высокую несущую способность; – Наружное кольцо работает на сжатие, а внутреннее – на растяжение, что позволяет использовать железобетон и сталь соответственно.	– Большое количество типоразмеров плит; – Сложность устройства водоотводящих систем.	Павильон США на Всемирной выставке в Брюсселе (1968 г.), перекрытый двухпоясной радиальной вантовой системой диаметром 104 м.
Покрытия с перекрестным расположением вант	Сформированные двумя взаимно перпендикулярными группами параллельных тросов – несущих и стабилизирующих – такие конструкции образуют поверхность седловидной формы. Это сочетание обеспечивает уникальную геометрию и стабильность системы.	– Широкие возможности для создания разнообразных архитектурных форм; – Эффективное использование материалов.	– Высокая чувствительность к ветровым и температурным воздействиям; – Риск динамической неустойчивости (флаттера) при малой кривизне.	Дворец спорта «Юбилейный» в Санкт-Петербурге, где несущие и стабилизирующие тросы крепятся на колоннах на разных уровнях, что сокращает высоту здания и упрощает водоотвод.

«тенсегрити» в своей кровельной системе. Покрытие состоит из движущихся панелей, поддерживаемых сетью вант и тросов, что обеспечивает легкость и функциональность конструкции.

Павильон компании Tensys (Великобритания). Компания Tensys специализируется на проектировании тенсегрити-систем. Один из их проектов – павильон, где использована комбинация натянутых мембран и вант для создания легкой, но прочной конструкции.

Купола Эдварда Фуллера. Ричард Бакминстер Фуллер, один из пионеров концепции тенсегрити, создал множество купольных конструкций, основанных на принципах напряженной целостности. Монреальский биосфере (1967 год) – геодезический купол для выставки Экспо 67, хотя он не является классическим «тенсегрити», но демонстрирует идеи, лежащие в основе этой технологии [21].

Примеры применения «тенсегрити»-структур показывают их универсальность и потенциал в различных областях: от архитектуры до строительства. Эти конструкции сочетают в себе легкость, устойчивость и эстетическую привлекательность, что делает их идеальным решением для сложных архитектурных задач.

Рассмотрев инновационные технологии строительства уникальных зданий и сооружений с целью повышения производительности в строительной отрасли, можно выделить уникальный метод монтажа вантовых ферм с использованием временной канатной дороги, предложенный французской компанией «Freissine». Данная система представляет собой конструкцию длиной 125 метров, закрепленную двумя металлическими упорами на верхнем кольце объекта. Для минимизации провисания канатной дороги применялась лебедка, создающая натяжение усилием около 16 тонн. Конструкция опиралась на два специальных металлических седла, установленных над верхним кольцом.

Данный метод позволяет осуществлять монтаж вантовых ферм одновременно с двух противоположных сторон. Работы выполняются с рабочих платформ, размещенных на различных уровнях железобетонных колец, что обеспечивает возможность работы как с нижними, так и с верхними поясами вант параллельно. Строительные краны доставляют стойки вантовых ферм на платформы, где они крепятся к вантам при помощи чугунных хомутов и анкерных соединений. Конструкция анкеров предусматривает

комбинацию регулируемых и нерегулируемых элементов: один конец фермы фиксируется нерегулируемым анкером с вилкой, а другой — регулируемым анкером с гайкой для точной настройки натяжения и создания предварительного напряжения.

Перемещение готовых ферм по канатной дорожке осуществляется при помощи лебедок и кареток. После достижения заданной позиции фермы крепятся в неподвижных анкерах на железобетонных перекрытиях. В центральном кольце используются только регулируемые анкеры для точной балансировки системы. Во время монтажа нижние ванты затягиваются с усилием 14 тонн, а верхние — с усилием 2 тонны, что обеспечивает устойчивость конструкции до завершения работ.

После установки всех 48 вантовых ферм проводится этап предварительного напряжения покрытия. Натяжение верхних вант выполняется поэтапно с использованием домкратов и усилиями 14, 35 и 51 тонна соответственно. Такой последовательный процесс гарантирует равномерное распределение нагрузок и высокую прочность всей конструкции [22].

Этот метод демонстрирует высокий уровень технической проработки и инновационного подхода, позволяющего существенно повысить производительность и качество монтажных работ при возведении сложных вантовых конструкций. Ком-

пьютерный анализ показал, что для обеспечения устойчивости центрального кольца необходимо создавать предварительное натяжение двух диаметральных вантовых ферм на всех этапах монтажа. Затем натягивались ортогональные фермы, и только после этого — остальные. В результате предварительное напряжение в несущих вантах увеличивалось с 14 до 37 тонн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ основных характеристик вантовых покрытий показывает, что каждый тип конструкции имеет свои достоинства и недостатки. Однако наибольший интерес вызывают покрытия с перекрестным расположением вант и арочно-вантовые комбинированные системы. В современном строительстве применение данных типов конструкций является развивающимся направлением. Комбинированные системы, в том числе «tensegrity»-структуры, широко применяются при возведении различных зданий и сооружений современной архитектуры. Перспективным направлением развития в проектировании прочных и долговечных зданий и сооружений является использование современных материалов, включая наноматериалы в вантовых конструкциях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Еремеев П.Г. Висячие конструкции. *Строительные материалы*. 2022;10:62–67. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-62-67> EDN: HOJHSN
2. Krishnan S. Cable-stayed columns and their applications in building structures. *Journal of Building Engineering*. 2020;27:100984. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100984> EDN: QHWRUY
3. Долгополов В. Е., Горзова С. П., Кононенко В. В. Вантовые конструкции в строительстве. *Тенденции развития науки и образования*. 2024;109-15:36-41. <https://doi.org/10.18411/trnio.05-2024-780> EDN: DRRTAD
4. Habibi T., Rhode-Barbarigos L., Keller T. Effects of prestress implementation on self-stress state in large-scale tensegrity structure. *Engineering Structures*. 2023; 288:116222. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116222> EDN: ATKRJO
5. Gomez-Jauregui V., Carrillo-Rodriguez A., Manchado C., Lastra-Gonzalez P. Tensegrity applications to architecture, engineering and robotics: a review. *Applied Sciences*. 2023;13(15):8669. <https://doi.org/10.3390/app13158669>
6. Еремеев П.Г. Вантовая комбинированная конструктивная система «Тенсегрити». *Промышленное и гражданское строительство*. 2021;1:21-27. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.01.21-27>
7. Krivoschapko, S. N. Cable-stayed structures for public and industrial buildings. *Building and Reconstruction*. 2019;1(81):23-47. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-23-47> EDN: RJNAFF
8. Чесноков А. В., Михайлов В. В., Долматов И. В. Определение продольных жесткостей поясов и предварительного напряжения двухпоясных вантовых ферм. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024; 9(789):5-18. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2024-789-9-5-18> EDN: NMDZSM
9. Кишиневская Е.В., Ватин Н.И., Кузнецов В.Д. Перспективы применения нанобетона в монолитных большепролетных ребристых перекрытиях с постнатяжением. *Инженерно-строительный журнал*. 2009; 2(4):54–58. <https://doi.org/10.18720/MCE.4.8>
10. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии. *Инженерно-строительный журнал*. 2009;6(8):25-33. <https://doi.org/10.18720/MCE.8.1>
11. Курятников Ю.Ю., Смирнов М.А., Федоров Ф.Г. Керамзитобетон с улучшенными характеристиками для транспортного строительства. *Технологии бетонов*. 2016; 5-6(118-119):23-25. EDN: WJHXHP

12. Иноземцев А.С., Королев Е. В. Экономические предпосылки применения высокопрочных легких бетонов. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2012;5:198–205. EDN: PDKSOT
13. Балыков А.С., Каледина Е.А., Володин С.В. Прогнозирование прочности при сжатии и проектирование составов конструктивных легких бетонов с применением методов машинного обучения. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(2):171–186. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-171-186> EDN: CCPGIF
14. Орлов Д.В. Монолитные конструкции из легкого модифицированного нанобетона на примере пятиэтажной разноуровневой автостоянки. *Инженерно-строительный журнал*. 2010;5(15):12–15. <https://doi.org/10.18720/MCE.15.2>
15. Мазитова А.К., Буйлова Е.А. Получение ингибиторов коррозии, содержащих синергетические нанодобавки. *Нанотехнологии в строительстве*. 2022;14(6):449–454. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-449-454> EDN: RASRBY
16. Массалимов И.А., Чуйкин А.Е., Массалимов Б.И., Мустафин А.Г. Новые защитные покрытия на основе наночастиц серы, полученных из полисульфида калия. *Нанотехнологии в строительстве*. 2023;15(1):27–36. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-1-27-36> EDN: HDSIDW
17. Кузнецов Н. В. Висячие и вантовые конструкции в строительстве. *Научный форум: сборник статей VIII Международной научно-практической конференции*. Пенза, 2024:251–254. EDN: UTICUD
18. Тюрин М. Р., Степанов А. Ю., Толмачева В. М. Вантовые конструкции и их эффективность в качестве строительных элементов. *Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых: сборник научных статей 4-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок*, Курск, 2023: 413–415. EDN: ZNTFBF
19. Агеева Е.Ю., Тишков В.А., Филимонова А.Е. *Конструктивные особенности висячих покрытий в общественных зданиях*. Учебное пособие для вузов. Н. Новгород: ННГАСУ, 2015:87. ISBN 978-5-528-00037-4
20. Yu X., Yaozhi L., Yafeng W., Xian X., Hua-Ping W., Yanbin S., Wenwei F. A new configuration of Geiger-type cable domes with sliding ridge cables. Computational framework and structural feasibility investigation. *Engineering Structures*. 2023;286:116028. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116028> EDN: XEXGWC
21. Feng Y., Yuan X.F., Samy A. Analysis of new wave-curved tensegrity dome. *Engineering Structures*. 2022; 250: 113408. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113408>
22. Батова А. В., Варбан М. Инновационные технологии возведения вантового покрытия спортивно-развлекательного комплекса «Минск-Арена». *Цифровая и отраслевая экономика*. 2021; 1(22):65–71. EDN: OEZCVV

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузьмина Татьяна Константиновна – кандидат технических наук, доцент кафедры Технологии и организации строительного производства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, kuzmina_tk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8454-1765>

Большаков Антон Николаевич – аспирант кафедры Технологии и организации строительного производства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, Abolshakov002@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8781-1166>

Лукьянова Надежда Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры Строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, galcevanadezda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2014-6739>

Пузикова Анастасия Вячеславовна – специалист по учебно-методической работе, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, PuzikovaAV@mgsu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1796-771X>

ВКЛАД АВТОРОВ

Кузьмина Т.К., Лукьянова Н.А. – научное руководство; итоговые выводы.

Большаков А.Н. – концепция исследования; написание исходного текста.

Пузикова А.В. – обработка материала, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.04.2025; одобрена после рецензирования 03.06.2025; принята к публикации 05.06.2025.