

Рационализация технологических, конструктивных и архитектурных решений вантовых покрытий большепролетных объектов спортивного назначения

А.А. Карамышева, Д.А. Строев, М.А. Колотиенко, Д.В. Гранкина

Донской государственный технический университет

Аннотация: В работе представлен анализ спортивных объектов с вантовыми покрытиями, в разрезе прогрессивных решений, применяемых на различных циклах строительства. На основе проведенной систематизации выделены направления рационального применения выявленных методов снижения материалоемкости и деформативности, увеличения жесткости, устойчивости конструкций, повышения эффективности монтажных работ.

Ключевые слова: вантовое покрытие, большепролетное здание, стальной канат, аэродинамика, вант, пилон, спортивный объект, стадион, висячая кровля, светопрозрачная кровля, световой проем, система мониторинга технического состояния объекта, монтаж вант.

За счет многоцелевого использования, объекты спортивного назначения сегодня выполняют градообразующую функцию, играют роль решающих точек развития инфраструктуры, обладают перспективами в качестве инвестиционных проектов [1]. В процессе формообразования объекта решающим элементом является покрытие, при последующем проектировании которого необходимо учитывать не только функциональную целесообразность, но и экономические показатели, обусловленные затратами на транспортировку и монтаж конструктивных элементов, расход материалов и временных ресурсов. Благодаря новейшим разработкам в области параметрического проектирования, с применением расчетных программных комплексов (РПК далее), стало возможным создание высокотехнологичных, оптимизированных к условиям эксплуатации, покрытий различных конфигураций. Помимо стандартных требований, предъявляемых к устойчивости, надежности и долговечности конструкций, необходимо учитывать специфику объектов строительства: тенеобразование, светопрозрачность, аэродинамичность, интеграцию объекта с окружающей эксплуатируемой застройкой.

Потребность в систематизации решений покрытий стадионов и дворцов спорта обусловлена многообразием их конфигураций. На сегодняшний день наиболее распространены при проектировании кровель спортивных объектов, системы, отвечающие требованиям светопрозрачности: мембранное заполнение на рамной сетке, используемое при строительстве стадиона «Фишт» (Сочи, РФ), или тросовой поддержке, представленное в проекте «The O2 Arena» (London, UK); система вида оболочки («Мордовия Арена» (Саранск, РФ)); пространственные структуры сводчатого типа, такие как купол из профнастила со световым проемом стадиона «Самара Арена» (Самара, РФ). Среди прочего выделяется конструкция, на основе системы растянутых элементов, образующих висячее или вантовое покрытие. Ранее нами были описаны вантовые решения мостовых сооружений [2, 3], однако эффективность тросовой системы не ограничена исключительно объектами транспортного сообщения, ванты рациональны и при строительстве большепролетных объектов общественного назначения. По конструктивной схеме вантовые покрытия зданий могут иметь следующие конфигурации: однопоясные покрытия, ванты которых расположены параллельно («Дворец спорта» (Вильнюс, Литва)) либо радиально; двухпоясные- включающие систему из несущих и стабилизирующих вант, с включением распорных элементов («Минск-Арена» (Минск, Белоруссия)); струнные и сетчатые системы (каток «Ingalls Rink» (New Haven, Connecticut, USA)); покрытия с жесткими вантовыми балками (бассейн «Олимпийский» (Москва, РФ)); комбинированные системы. Вариативна и конфигурация опорных контуров вантовых конструкций: они могут иметь плоскую и различных типов пространственную структуру.

Переход вантовых систем из узкоспециальных конструкций мостостроения на качественно новый уровень обусловлен строительством стадиона «Olympiastadion» (Munich, Germany) - первого стадиона с

покрытием, включающем систему стабилизирующих стальных тросов. Примечательно, что примененные в 1972 году решения, актуальны сегодня, претерпев лишь незначительную модернизацию. Покрытие включает девять седловидных сетчатых структур, со стороной квадрата 762 мм, формирующие их тросы выполнены из стали и имеют поперечное сечение 25 мм. Включенные в работу дополнительные дугообразные сетки служат связующими между основными элементами и опорными пилонами переменного сечения [4]. Результирующая пространственная структура отличается высокой эффективностью при работе на восприятие и гашение колебаний, вызванных пульсацией ветра. Восприятие внешних нагрузок, а также компенсация внутренних напряжений, производится массивным фундаментом, имеющим столбовую структуру сечением до 6 м. и глубиной заложения 18 м.

Необходимо учитывать, что на каждой из стадий реализации проекта, вантовые покрытия требуют принятия оптимальных комплексных решений. С целью выявления основных приемов, позволяющих рационализировать применение вантовых покрытий, нами проведена систематизация исследуемых объектов на различных циклах строительства.

1. Проектирование

На стадии проектирования особое внимание уделяется формообразованию, широкую вариантность которого определяет представленное ранее многообразие возможностей вантовых систем. Пространственные структуры с выпукло-вогнутыми сетками наиболее эффективны при восприятии сложных сочетаний нагрузок, так как обеспечивают жесткость и снижение деформативности без существенного увеличения веса конструкции. Вогнутые ванты выполняют несущие функции, выгнутые- стабилизирующие, обеспечивающие предварительное

напряжение, их система создает седловидную поверхность отрицательной гауссовой кривизны [5, 6].

Примечательна кровля спортивной арены «Dorton Arena» (Raleigh, USA). Сетка покрытия имеет шаг ячейки 1830 мм., расположена она на паре скрещенных параболических арок, работающих на сжатие и передачу нагрузок на фундамент. Стальные тросы, в свою очередь, работают на растяжение и определяют устойчивость арочной системы. Отсутствие потребности в опирании арок на дополнительные стойки или стены обеспечило снижение материало- и трудозатрат [7].

2. Монтаж и транспортировка

В целом, каждый объект разрабатывается из условий минимизации затрат на материалы, простоту их транспортировки, сокращения сроков строительства, упрощения монтажных, сборочных работ. Уникальным решением стал монтаж покрытия после завершения строительства объекта, при реконструкции олимпийского стадиона имени Спиридона Луи «Olympic Stadium of Athens Spyros Louis» (Athens, Greece). Покрытие стадиона состоит из парных металлических арок (длина каждой 300 м.), закрепленные на которых ванты удерживают листы поликарбоната. В рекордные сроки (14 месяцев), на, проектируемом изначально в качестве открытого, стадионе, была смонтирована конструкция весом более 19 000 тонн. При этом устройство фундаментов проводилось одновременно для основных несущих элементов и для временных опор, служащих сборочными платформами системы покрытия. Сборка стальной конструкции производилась на расстоянии 70 м. от конечного расположения, что обеспечило возможность одновременного ведения ремонтных работ внутри стадиона [8]. Транспортировка арочных элементов осуществлялась, в том числе, при помощи водного сообщения, что стало возможным благодаря последующей укрупнительной сборке.

Решающий аспект, определяющий сохранность вантовых конструкций в процессе монтажа,- возникновение монтажных напряжений. Предупредить развитие деформаций в процессе транспортировки и сборки при строительстве стадиона «Волгоград Арена» (Волгоград, РФ) позволил программный расчет, произведенный для элементов в каждом из строительных циклов. Кровля представляет собой расходящиеся от центральных колец ваны, работающие с опорным кольцом, поддерживаемом системой колонн. Транспортировка конструктивных элементов упрощена тем, что само кольцо весом более 1300 тонн состоит из 44 одинаковых сегментов. Эксплуатационная безопасность объекта была гарантирована применением новейших разработок: предварительно произведенным расчетом нагрузок средствами РПК и испытаниями макета стадиона в аэродинамической трубе.

3. Эксплуатация и реконструкция.

Говоря об эффективности объекта на стадии эксплуатации необходимо учитывать требования к жесткости, надежности и прочности системы. С целью обеспечения требуемых показателей жесткости, в работу конструкций вводятся дополнительные элементы, такие как: вертикальные и горизонтальные связи, прогоны, стойки фахверка. Данные решения должны быть заложены на стадии проектирования объекта. Известны случаи, когда проект приходилось видоизменять и после возведения объекта. Необходимо уточнить, что сегодня наблюдается тенденция снижения такого рода работ, в связи с растущими возможностями прогнозирования работы конструкций в условиях эксплуатации с применением РПК. Покрытие стадиона «Olympic Stadium Montreal» (Montreal, Canada) было заменено несколько раз, вследствие многочисленных отказов конструктивных элементов, вызванных внерасчетными нагрузками, воздействием стихийных бедствий, износом материалов. Конструкция представляла собой полотно, натянутое двадцатью

пятью вантами, закрепленными на наклонной башня, являющейся частью инфраструктуры объекта. Первоначальный проект подразумевал, что лист из синтетического текстиля будет отвечать требованиям к весу конструкции и ее надежности, при восприятии ветровых и снеговых нагрузок [9]. Однако пульсирующее ветровое воздействие в сумме с натяжением спровоцировало разрушение материала в точках подвеса. Повторно было спроектировано многосекционное полотно, прикрепленное к опорной башне проволочными конструкциями, однако, следующая авария произошла до возвращения объекта в эксплуатацию- покрытие не выдержало веса осадков. На данный момент на объекте действуют эксплуатационные ограничения, производится мониторинг, согласована разработка третьего варианта покрытия.

Отказ одного элемента в системе не всегда влечет полное разрушение объекта. Так для строительства конькобежного центра в Крылатском (Москва, РФ) была спроектирована уникальная система распределения усилий от конструкций на фундамент. Большепролетное покрытие удерживается девятнадцатью вантами, закрепленными на Л-образной опоре (высота порядка 65 м., сечение 2500 мм.), опирающуюся на две оттяжки. Ванты крепятся к оголовку пилона с применением вертикальных ребер с включением листовых вставок. В процессе эксплуатации вышел из строя шарнирный стержень, работающий в вантовой системе, что создало предаварийную ситуацию. Причина разрушения комплексна и включает возможное наличие остаточных напряжений, вследствие усталостного восприятия циклических нагрузок, характеристики самого конструктивного элемента. Благодаря оперативному обнаружению и проведенной реконструкции объект повторно введен в эксплуатацию и сегодня отвечает повышенным требованиям к надежности. Примечательно использование системы мониторинга несущих конструкций, запатентованной компанией «СОДИС Лаб» (Москва, РФ), внедрение которой в строительные объекты

является одним из перспективных решений для обеспечения эксплуатационных качеств большепролетных объектов.

На основе анализа мирового и отечественного опыта строительства систематизированы основные аспекты проектирования, монтажа, эксплуатации и реконструкции вантовых кровель, требующие внедрения инновационных разработок (таблица №1).

Таблица № 1

Рационализация технологических, архитектурных и конструктивных решений вантовых покрытий спортивных объектов

Область рационализации	Технологическое решение	Архитектурные и конструктивные решения
Повышение монтажной и транспортной эффективности элементов конструкций	1. Укрупнительная сборка перед установкой в проектное положение; 2. Поочередный монтаж двухпоясных покрытий с применением домкратов для натяжения	1. Открытые пространства, внутри объекта, упрощающие укрупнительную сборку; 2. Размещение монтажных домкратов на опорных контурах
Повышение жесткости и устойчивости конструкции и/или отдельных элементов	1. Применение разнонаправленной резьбы в монтажных муфтовых соединениях; 2. Предварительное натяжение вант	Введение жестких тросов, распорных элементов, двухпоясных систем
Обеспечение устойчивости к	Испытание модели объекта в аэродинамической трубе	1. Уравновешенные выгибы [10];



воздействию резонансных явлений		2. Конструирование седловидных покрытий
Снижение деформативности конструкций	Проведение предварительной пригрузки	Применение двухпоясной или перекрестной конфигурации
Применимость конструкции в условиях большепролетного строительства	1. Транспортировка вант, свернутыми в бухты; 2. Возможности укрупнительной сборки	Включение в работу гибких элементов канатного типа. На сверхбольших (более 300) пролетах – жестких вант
Обеспечение безотказной работы конструкций	Установка систем мониторинга технического состояния	Применение систем компенсирующих отказ единичного элемента
Минимизация расхода материалов и оборудования	1. Применение многопрядевых тросов (сердечник укрупненного сечения и проволочные пряди); 2. Соединение элементов сплеткой, обеспечивающее отсутствие дополнительных муфт, хомутов (снижение надежности, в сравнении с заливкой в муфте)	1. Применение опорных пилонов переменного сечения; 2. Общая эффективность вантовых систем для снижения металлоемкости

Литература

1. Шумейко В. И., Евтушенко А.И., Кудлаева А.А. Перспективы развития стадиона как многофункционального спортивного объекта // Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4111.
2. Карамышева А.А., Строев Д.А., Колотиенко М.А. Анализ и систематизация причин разрушения мостовых сооружений // Инженерный вестник Дона, 2019, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5825.
3. Карамышева А.А., Колотиенко М.А., Гранкина Д.В. Основные методы повышения устойчивости и жесткости большепролетных вантовых и висячих мостовых сооружений // Инженерный вестник Дона, 2019, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5830.
4. Kara H., Bosia D. Design Engineering Refocused AD Smart. USA: John Wiley & Sons, 2016. 82 p.
5. Orton A. The Way We Build Now. UK: Taylor & Francis, 2013. pp. 94-95.
6. Pakrastinsh L., Rocens K. Cable material consumption depending the geometrical parameters of hierarchic roof // Final Conference of COST Action C12 «Improvement of Buildings' Structural Quality by New Technologies». USA: CRC Press, 2005. pp. 185-193.
7. Kupper L.L., Neelon B. H., O'Brien S. M. Exercises and Solutions in Statistical Theory. USA: CRC Press, 2013. 1102 p.
8. Spiro Pollalis N. The roof of the olympic stadium for the 2004 athens olympic games // Harvard Design School, 2006, №6. URL: gsd.harvard.edu/wp-content/uploads/2016/06/pollalis-case-OACA-v1.pdf
9. Holgate A. The Art of Structural Engineering: The Work of Jörg Schlaich and His Team. Germany: Edition Axel Menges, 1997. 128 p.
10. Buchholdt H. A. An Introduction to Cable Roof Structures. UK: Thomas Telford, 1999. pp. 99-101.

References

1. Shumeyko V. I., Yevtushenko A.I., Kudlayeva A.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4111.
2. Karamysheva A.A., Stroev D.A., Kolotienko M.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2019, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5825.
3. Karamysheva A.A., Kolotiyenko M.A., Grankina D.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2019, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5830.
4. Kara H., Bosia D. Design Engineering Refocused AD Smart. USA: John Wiley & Sons, 2016. 82 p.
5. Orton A. The Way We Build Now. UK: Taylor & Francis, 2013. pp. 94-95.
6. Pakrastinsh L., Rocens K. Final Conference of COST Action C12 "Improvement of Buildings' Structural Quality by New Technologies". USA, 2005. pp. 185-193.
7. Kupper L.L., Neelon B. H., O'Brien S. M. Exercises and Solutions in Statistical Theory. USA: CRC Press, 2013. 1102 p.
8. Spiro Pollalis N. Harvard Design School (USA), 2006, №6. URL: gsd.harvard.edu/wp-content/uploads/2016/06/pollalis-case-OACA-v1.pdf.
9. Holgate A. The Art of Structural Engineering: The Work of Jörg Schlaich and His Team. Germany: Edition Axel Menges, 1997. 128 p.
10. Buchholdt H. A. An Introduction to Cable Roof Structures. UK: Thomas Telford, 1999. pp. 99-101.