

Расчет и проектирование строительных конструкций

ВАНТОВЫЕ СТРУКТУРЫ

С.Н. КРИВОШАПКО, д.т.н., профессор,
Российский университет дружбы народов, Москва
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6; sn_krivoshapko@mail.ru

Вантовые конструкции просты в монтаже, легкие по весу, надежны в эксплуатации, а во многих случаях отличаются и архитектурной выразительностью. Представлены наиболее знаковые конструкции и сооружения всех типов, согласно предложенной классификации, имевшие на момент строительства практическую значимость и новизну, отмеченные наградами профессионального сообщества или вошедшие в рейтинги научных журналов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: висячие структуры, вантовые структуры, висячая вантовая структура, подвесное вантовое покрытие, ванта, пилон, висячие мосты.

Введение

В висячих конструкциях внешнюю нагрузку воспринимают тросы (стальные канаты), кабели, цепи, прокатный металл и листовые мембраны, работающие только на растяжение. В висячих вантовых системах ванты (нити) или тросовые плоские, или пространственные фермы поддерживают жесткие элементы (балки, плиты, арки, рамы), работающие на изгиб, в проектном положении, а уже на эти жесткие элементы укладывают ограждающие конструкции. К вантовым структурам, помимо висячих вантовых систем, будем относить также конструкции, в которых ванты являются стабилизирующими элементами или участвуют в создании геометрического образа сооружения. Простейшей вантовой структурой можно было бы считать *идеальную нить*, т.е. нить, которая не оказывает сопротивления изгибу и кручению. Однако архитекторы считают, что оставаясь всегда прямолинейными, ванты не принадлежат к семейству гибких нитей [1].

Висячие тросовые конструкции (тросовые сети) отличаются от вантовых систем тем, ограждающие элементы в них укладываются непосредственно на тросы или тросовую сеть. Ванты иногда называют *открытыми тросами*. В работе [2] приводится классификация висячих тросовых конструкций.

Учитывая, что ванты – это открытые тросы, можно предложить следующую классификацию вантовых структур в зависимости от их конструктивных особенностей и назначения:

- висячие вантовые структуры, поддерживающие в отдельных точках тентовые покрытия,
- вантовые стабилизирующие растяжки для контурных опорных элементов тентовых покрытий,
- подвесные (висячие) вантовые покрытия с одной несущей стойкой (пилоном),
- подвесные вантово-стержневые покрытия с несущими стойками в один или несколько рядов,
- висячие вантово-арочные (арочно-вантовые) покрытия,
- консольно-вантовые системы,
- вантовые конструкции башенного типа в форме однополостного гиперболоида, с вантами, совпадающими с прямыми образующими однополостного гиперболоида,
- тросовые оттяжки высоких мачт,
- висячие мосты.

Как видно из классификации висячие тросовые конструкции и покрытия сооружений, в рассматриваемую группу сооружений не включены, хотя вместе с мембранными покрытиями они составляют более широкий класс висячих конструкций. В.В. Ермолов [1] привел в табличной форме основные схемы установки стоек и расположения вант в подвесных вантово-стержневых и висячих вантово-арочных покрытиях (рис. 1).

Тросовые и вантовые конструкции позволяют перекрывать пролёты более 200 м, однако обычно диапазон перекрываемых пролётов составляет 50-150 м. Ванты висячих конструкций, как правило, - это тросы одинарной или двойной свивки, изготовленные из высокопрочной проволоки диаметром 4-6 мм. Проволока меньших диаметров не рекомендуется, что обусловлено ее пониженной коррозионной стойкостью [3]. В зависимости от касания между собой проволок тросы делятся на тросы с точечным (ТК) и линейным (ЛК) касанием проволок. Канаты типа ТК более жесткие, чем типа ЛК.

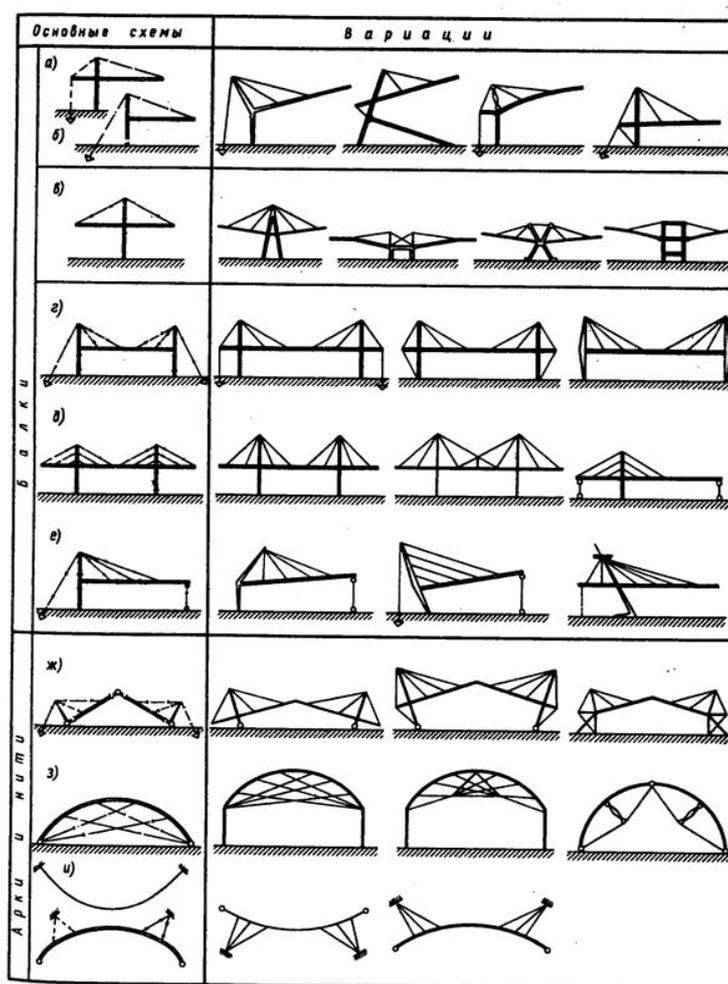


Рис. 1. Схемы установки стоек и расположения вант в подвесных вантово-стержневых и висячих вантово-арочных покрытиях

Наклонные ванты расходятся лучами из верхних точек пилонов. Часто ванты идут параллельно друг другу по схеме «арфа». Углы наклона вант должны быть не менее 30° , в исключительных случаях до 25° .

Считается, что ванты сохраняют прямолинейную форму, поэтому их можно изготавливать из стержней, полос, профилей и т.д.

Ванты расположены снаружи на открытом воздухе, поэтому они требуют эффективной защиты от возможной коррозии. Принимаемые меры по защите вант от коррозии будут рассмотрены в дальнейшем на конкретных примерах возведенных сооружений. Другим существенным фактором, влияющим на эксплуатационные свойства вантовых покрытий, являются принятые решения для узлов прохода подвесок через кровлю, которые достаточно сложны и требуют высококачественного исполнения работ, гарантирующего отсутствие протечек.

Рассмотрим примеры реальных вантовых сооружений согласно предложенной классификации, построенные преимущественно в конце XX и начале XXI века. Очень интересные сведения о висячих структурах, реализованных в проектах или натуре в XIX и XX веках, можно найти в книге [4].

Висячие вантовые структуры, поддерживаемые в отдельных точках тентовые покрытия

Для иллюстрации сооружений этого типа можно привести куполообразную крышу Национального теннисного центра в Лондоне, Великобритания. Покрытие перекрывает 11500 м² плана. Под ним расположены объемные структуры различного назначения (6 кортов для игры в теннис, специализированная гимназия, спортивная клиника, помещения для тренеров и т.д.). Одна из объемных структур перекрыта тентовой конструкцией, которая поддерживается системой вант с двумя трубчатыми опорами (рис. 2).



Рис. 2. The Lawn Tennis Association's National Tennis Centre (Hopkins Architects), Великобритания, Лондон, 2008

или пластиковых ремешков. Использование вант позволило отказаться от массивного каркаса с нагромождением металлических ферм и балок, которые задавали бы воздушную легкость тентового полотна [Ф. Надежный, <http://www.teniradi.ru>].



Рис. 3. Тентово-вантовое летнее кафе



Рис. 4. Фрагмент покрытия Олимпийского стадиона в Мюнхене, Германия

Конструкции рассмотренного типа могут быть причислены как к тентовым структурам, так и к висячим вантовым структурам. Дополнительные примеры висячих тентово-вантовых структур приведены в работах [5, 6].

К этой же группе висячих вантовых структур причисляются покрытия из материала, не являющегося тентом, но работающим тоже только на растяжение.

Ярким представителем этих структур является покрытие Олимпийского стадиона в Мюнхене, Германия (рис. 4). Стадион был построен в 1972 году, архитекторы Фрей Отто (Frei Otto) и Гюнтер Бениш (Gunter Behnisch).

Вантовые стабилизирующие растяжки для контурных опорных элементов тентовых покрытий

Данный вид вантовых конструкций является комбинированной структурой, которая включает в себя висячее тросовое покрытие, и имеет в своем составе несколько вант, которые являются стабилизирующими (рис. 5). Конструкции такого типа могут быть причислены, как к тросовым висячим структурам, так и к висячим вантовым структурам. При конструировании сооружений этого типа особое внимание необходимо уделить анкерам – устройствам, служащим для передачи усилий от основной конструкции на грунтовую основу.



Рис. 5. Тросово-вантовая структура

Подвесные (висячие) вантовые покрытия с одной несущей стойкой (пилоном)

Крытый конькобежный центр «Крылатское» (ледовый дворец в Крылатском) - крупнейшее в Европе сооружение этого типа, открыт в 2006 году. Здесь покрытие с помощью вант подвешено к одной \square -образной опоре, установленной на оси симметрии сооружения со смещением вдоль этой же оси (рис. 6). Две оттяжки опоры обеспечивают равновесие всей вантовой системы. В конце 2007 года в ледовом дворце возникла аварийная ситуация из-за провисания крыши. Было установлено, что причиной аварийной ситуации стал брак, допущенный при изготовлении металлических конструкций. Аналогичная схема подвески стальной стержневой прямоугольной плиты покрытия с помощью вант к единственной вертикальной стальной стойке применено к сооружению в Ля-Рашели, Франция (Ré Island Toll Gate, La Rochelle, Poitou-Charente). С учетом смещения опоры по отношению к центру плиты покрытия два ближайших к стойке угла плиты заанкерены в землю.



Рис. 6. Вид на ледовый дворец в Крылатском, Москва, со стороны единственного пилона.

Аналогичная схема подвески стальной стержневой прямоугольной плиты покрытия с помощью вант к единственной вертикальной стальной стойке применено к сооружению в Ля-Рашели, Франция (Ré Island Toll Gate, La Rochelle, Poitou-Charente). С учетом смещения опоры по отношению к центру плиты покрытия два ближайших к стойке угла плиты заанкерены в землю.

Подвесные вантово-стержневые покрытия с несущими стойками в один или несколько рядов



Рис. 7. Павильон Великобритании на ЭКСПО-70 в Осаке, Япония



Рис. 8. Технологический центр в Принстоне, США [8]

Этот тип вантовых покрытий считается наиболее простым и распространенным, часто эти покрытия называют *вантово-балочным*. Здесь балка жесткости поддерживается вантами в одной или нескольких точках. Ванты закрепляются на *стойках*, которые расчлены в поперечном и продольном направлении.

Павильон Великобритании на ЭКСПО-70 в Осаке представляет собой однорядную систему из 4-х стальных рам высотой 34 м, к которым с помощью подвесок подвешена несущая конструкция крыши и стеновое ограждение (рис. 7).

Однорядная система из трех колонн, к которым в одном уровне прикреплены ванты, поддерживающие покрытие в двух направлениях описаны в статье [7] на примере одного из вантовых сооружений в Риме (Italtubi warehouse), Италия.

Необычное здание Технологического центра в Принстоне (the PA Technology Center in Princeton, NJ, North America) запроектировано архитектором Р. Роджерсом (Richard Rogers) в стиле «хай тэк» (the high tech architecture movement) в период его наибольшей популярности, который пришелся на 1960-1990 годы. Здание построено в 1982 году. Архитектор отказался от традиционных колонн и балок в пользу стальных конструкций, обычно применяемых в мосто-



Рис. 9. Подвесная крыша в Лионе (suspended greenroof in Lyons, photo by Haven Kiers)

строения и при проектировании подъемных кранов (рис. 8). Модули (блоки) сооружения предварительно изготавливались на заводе, что значительно сократили сроки строительства.

Обратим внимание на интересное направление в архитектуре вантовых подвесных покрытий – строительство «зеленых крыш». Например, в Южной Франции в Леоне архитекторы Jourda и Perraudin создали подвесное покрытие площадью 8000 м² в форме зонтичной поверхности. На крыше растут дикие цветы и трава (рис. 9). Под этой крышей находятся аудитории международной школы. Еще большую площадь перекрывает

подвесное вантовое покрытие с зеленой крышей в Штутгарте, Германия (рис. 10). В настоящее время там находится Общественная транспортная компания (the public transportation company).

Часто подвесные вантово-балочные покрытия под-

строения и при проектировании подъемных кранов (рис. 8). Модули (блоки) сооружения предварительно изготавливались на заводе, что значительно сократили сроки строительства.

Обратим внимание на интересное направление в архитектуре вантовых подвесных покрытий – строительство «зеленых крыш». Например, в Южной Франции в Леоне архитекторы Jourda и Perraudin создали подвесное покрытие площадью 8000 м² в форме зонтичной поверхности. На крыше растут дикие цветы и трава (рис. 9). Под этой крышей находятся аудитории международной школы. Еще большую площадь перекрывает



Рис. 10. Зеленая крыша в Штутгарте (Green roof Service LLC, Stuttgart, Germany, photo by G. Breuning)



Рис. 11. Атлетический центр университета Чикаго, США



Рис. 12. Покрытие железнодорожной станции, Nanjing, Jiangsu Province, Китай

разделяют на три вида: а) подвесное покрытие с поперечной вантовой системой и двумя рядами несущих стоек (рис. 11); б) подвесное покрытие с поперечной вантовой системой и центральным рядом несущих стоек (рис. 7, 12); в) подвесное покрытие с продольной вантовой системой с одним или несколькими рядами несущих стоек (рис. 10, рис. 13).

Первое подвесное покрытие с кровлей из прозрачной пластмассы было построено над автобусной остановкой в Милане (Италия) в 1949 году. Наклонное покрытие системой вант подвешено к наклонным же несущим стойкам. Равновесие достигается специальными оттяжками, прикрепленными к краям покрытия.

Атлетический центр университета Чикаго (The Gerald R.ather Athletics Center of the University of Chicago) уникален тем, что здесь впервые применены несимметричные композитные стойки для крепления вант (рис. 11, рис. 14). Инновационное решение позволило перекрыть большую площадь, свыше 20000 фут². Отказ от применения железобетона, по мнению авторов проекта (Cesar Pelli & Associates teamed with OWP/P), дал ряд преимуществ, в том числе, по стоимости сооружения. Стойки наклонены под углом 10° к вертикали, как из эстетических соображений, так и из условий работы асимметричной конструкции [9]. Каждая стойка держит 3 искривленные балки (рис. 14). К большой стойке крепятся 3 ванты, а к малой – одна ванта.



Рис. 13. Подвесное покрытие с продольной вантовой системой, Милан, Италия

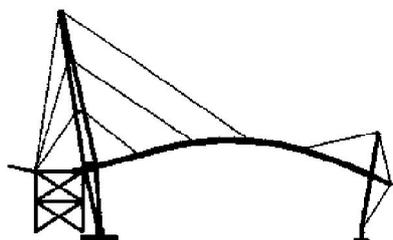


Рис. 14. Схема установки стоек атлетического центра университета Чикаго

Несущие ванты – тросы имеют диаметр 57 мм [10]. Схема размещения стоек и вант стадиона в г. Скво-Вэлли представлена на рис. 1 (шестая строка, второй столбец).

Схема трехшарнирной вантовой системы покрытия над катком в г. Брауншвейге (ФРГ) представлена на рис. 1 в шестой строке, в третьем столбце.

Классическое решение подвесного покрытия с поперечной вантовой системой и двумя рядами несущих вертикальных стоек воплощено в покрытии цветочного рынка «Pescia flower market», Италия [7].

В качестве примера подвесного покрытия с поперечной вантовой системой и центральным рядом несущих стоек можно взять вантовое покрытие железнодорожной станции в г. Nanjing (Jiangsu Province, Китай), рис. 12.

Подвесное покрытие над олимпийским стадионом в Скво-Вэлли (США) вмещает 8000 зрителей. Его размеры в плане – 94,82 × 70,80 м. Подвесное покрытие представляет собой восемь пар наклонных коробчатых балок переменного сечения, поддерживаемых вантами. Ванты опираются на 2 ряда стоек, установленных через 10,11 м. По балкам уложены прогоны, а по ним коробчатого сечения плиты длиной 3,8 м. Несущие ванты – тросы имеют диаметр 57 мм [10].

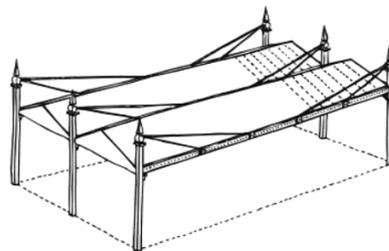


Рис. 15. Проект Ч. Макинтоша для Зеленого театра, 1853 г.

В 1853 г. Чарльз Макинтош (Charles MacIntosh) в своей работе «Книга сада» (“Book of the Garden”) впервые предложил конструкцию подвесного покрытия с продольной вантовой системой для Зеленого театра (Green House). Здесь каждая балка жесткости поддерживается четырьмя вантами, которые предусматривалось крепить к вертикальным стойкам (рис. 15). Однако для стоек (мачт) не предусматривались оттяжки с анкерами, и поэтому проект не был реализован [4].

Висячее покрытие над зданием бумажной фабрики в г. Мантуе, Италия, построено в 1963 г. Оно содержит шесть продольных балок жесткости пролетом 163 м с симметричными консолями по 43 м. Покрытие подвешено при помощи четырех вант к двум железобетонным пилонам высотой 45 м. Со стороны здания напоминает висячий мост [10].

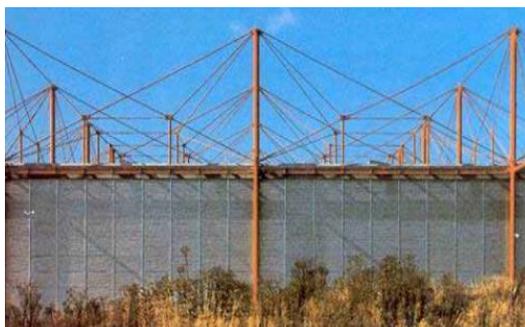


Рис. 16. Fleetguard factory Quimper, Франция

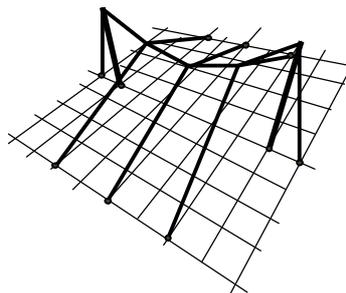


Рис. 17. Модель устойчивой вантовой структуры

Наличие такого вантового сооружения, как покрытие фабрики (Fleetguard factory Quimper) во Франции (рис. 16) и предложенная модель устойчивой вантовой структуры (рис. 17) [11] дает возможность ввести еще один вид (четвертый) вантовых покрытий в рассматриваемом классе – подвесное покрытие с поперечно-продольной вантовой системой. Покрытие фабрики во Франции (арх. Richard Roger, инж. Ove Arup, рис. 16) состоит из 25 модулей площадью 18 м². Каждый модуль покрытия содержит балки жесткости в двух направлениях и за углы подвешивается с помощью вант к стойкам.

Висячие вантово-арочные (арочно-вантовые) покрытия

Совершенно новые возможности висячих вантовых структур открыли знаменитые архитекторы Норман Фостер (рис. 18) и Сантьяго Калатрава (рис. 19).



Рис. 18. Стадион «Уэмбли», висячее вантовое покрытие, год постройки – 2006г., Лондон



Рис. 19. Стадион «Спирос Луис», висячее вантовое покрытие, год постройки – 2004 г., Афины

Их сооружения представляют собой отдельную группу висячих покрытий – *пилоновые арочно-вантовые покрытия*. Так называют висячую систему, которая поддерживается вантами, подвешенными к системе пилонов – арок. При этом

как пилоны, так и ванты, поддерживающие покрытие, расположены выше него, т. е. на ванты не укладываются ограждающие элементы покрытия.

Стадион «Уэмбли» (Wembley Stadium) – самая длинная однопролетная арочно-вантовая структура в мире. Арка держит край северной секции крыши стадиона. Стадион можно полностью открыть за 15 мин, убирая подвижные панели в южную неподвижную секцию крыши.



Рис. 20. Стадион в г. Дурбан (Южная Африка, построенный к чемпионату мира по футболу 2010 года)

Визитной карточкой г. Дурбан (Южная Африка) стал стадион Durban's Moses Mabhida Stadium, построенный к чемпионату мира по футболу 2010 года (рис. 20). Ведущий архитектор – Герхард Ле Ру (Gerhard le Roux). Тентовое укрытие для зрителей подвешивается к единственной арке – пилону при помощи вант, организованных в сетчатую структуру [12].

Очень важна проблема защиты вант от коррозии. В качестве защитных средств применяют цинкование, окраску, покрытие пластмассой.

Консольно-вантовые системы

Консольно-вантовые системы представляют собой балки жесткости, поддерживаемые за один конец вантами, а другим концом опирающиеся непосредственно на сооружение. Простейшим примером такой одноконсольной системы является вантовый консольный козырек (рис. 21), который крепится к несущей стене с помощью специальных растяжек – вант (тяги, растяжки). Тяги могут быть выполнены из прутков, труб или тросов. Козырьки консольно-вантового типа по желанию архитектора могут иметь большую зону покрытия, так как второй конец конструкции поддерживается вантами, через которую нагрузка от козырька передается опять же



Рис. 21. Козырек консольно-вантового типа длиной 6,5 м (стекло закаленное, нержавеющей сталь, ТМ-Ресурс: Архитектурные конструкции, Екатеринбург)



Рис. 22. Ангар в аэропорту Франкфурта-на-Майне

на основное сооружение. Прогибы концов консоли консольно-вантовых структур могут достигать больших величин порядка нескольких десятков сантиметров, поэтому их вылеты обычно принимают не более 40-50 м. Ярким представителем двухконсольного подвесного покрытия является ангар в аэропорту Франкфурта-на-Майне с вылетом одной консоли 55,65 м (рис. 22). Покрытие состоит из 16 оболочек с каждой стороны. Ширина одной железобетонной монолитной оболочки – 10,7 м, толщина – 8 см. По периметру оболочек расположены бортовые элементы сечением 22×30 см. Одна сторона оболочки шарнирно опирается на каркас центрального здания, а ее консольная часть поддерживается шестью канатами, каждый из которых состоит из 40 проволок овального сечения. Проволоки находятся в стальной трубке толщиной 0,35 мм. Для защиты вант от коррозии трубка наполнена цементным раствором. Допустимый прогиб конца консоли – 90 см.

Хорошо известно консольно-вантовое покрытие здания галереи для приема пассажиров в аэропорту Шереметьево (рис. 23). Покрытие галереи, круглое в плане, состоит из стальных балок, каждая из которых поддерживается четырьмя вантами диаметром 59 мм. Ванты крепятся к металлическому кольцу центральной



Рис. 23. Галерея для приема пассажиров в аэропорту Шереметьево

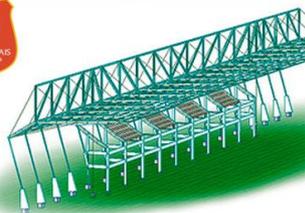


Рис. 24. Висячее вантовое покрытие ФК «Ренн», г. Ренн, Франция

ной зоны здания.

Висячее вантовое покрытие футбольного клуба «Ренн» (football club “Rennais”), построенное в 2004 году в г. Ренн, Франция, также можно причислить к консольно-вантовым системам (рис. 24). Здесь имеется опорная структура (трибуны), жесткие консоли в виде ломаных балок, которые за один конец поддерживаются вантами, а другими концами опираются на трибуну или зафиксированы к земле при помощи оттяжек и анкеров. Расчет конструкций выполнен компанией Egis.

Покрытие газовой станции в Милане, Италия (Gas station in Milano) также выполнено в виде консоли, поддерживаемой за один конец вантами, а другим концом, опирающимся на высокие стойки, расчаленными оттяжками [7] в поперечном направлении.

Вантовые конструкции башенного типа в форме однополостного гиперболоида, с вантами, совпадающими с прямыми образующими однополостного гиперболоида

Есть еще одна разновидность вантовых структур, где гибкие ванты воспринимают только растягивающие усилия. Но эти структуры выделены в отдельную группу, т.к. здесь ванты в отличие от висячих структур обеспечивают устойчивость сооружению, а главной несущей конструкцией является центральный пилон (столб).



Рис. 25. Сиднейская телебашня (Австралия). 2005. <http://www.enci.ru/>



Рис. 26. Гиперболоидная башня в порту Кобе

Иногда уникальным сооружениям башенного типа форма однополостного гиперboloида вращения придается с помощью вант или тросов. Сооружение состоит из центрального цилиндрического пилонa, на котором установлены кольцевые площадки, внешний контур которых совпадает с параллелями однополостного гиперboloида, а тросы располагаются в направлении прямолинейных образующих гиперboloида. К таким сооружениям можно отнести Сиднейскую телебашню (Австралия, рис. 25) и 108-метровую башню в порту Кобе (Япония, рис. 26), построенную по проекту компании Nikken Sekkei в 1963 году. Сравнивая эти две башни, при формoобразовании которых использовалась одна и та же форма однополостного гиперboloида вращения, можно заметить, что они совершенно не похожи друг на друга. В обоих случаях чувствуется работа талантливого архитектора.



Рис. 27. Тросовая башня градирни с центральным пилоном (Германия)

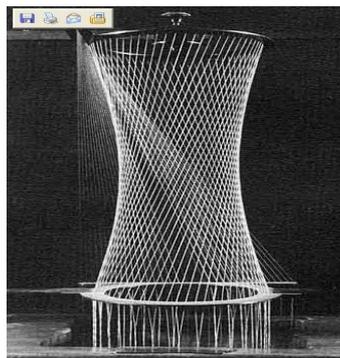


Рис. 28. Диагональная схема установки тросов в тросовой градирне

Еще одной областью применения вантов являются вантовые градирни. В ФРГ разработаны проекты вантовых конструкций вытяжных башен градирен (рис. 27), обладающих более высокими технико-экономическими показателями, чем традиционные железобетонные конструкции.

Основными конструктивными элементами вантовой градирни являются преднатяженные ванты из стальных канатов, размещенные в диагональном направлении (рис. 28). Вантовая градирня высотой 146 м с алюминиевой обшивкой построена в г. Шмехаузен (ФРГ) и имеет очертание образующей по гиперболе. Для придания башне этой традиционной формы потребовалась большая точность разметки вант и напесовка на них специальных крепежных деталей, но даже в этом случае из-за неравномерной вытяжки вант возможны отклонения от проектной формы, а, следовательно, и неравномерные усилия в вантах. Строго говоря, вытяжные башни градирен этого типа следует называть тросовыми башнями, т.к. здесь не используются открытые тросы.



Рис. 29. Вантовая башня в парке г. Штутгарта, Германия

Не менее интересна вантовая башня, подвешенная на центральном пилоне, возведенная в 2000 г. в парке Штутгарта (Killesberg tower, Killesbergpark) высотой 40 м (рис. 29). Башня в форме однополостного гиперboloида вращения запроектирована Ю. Шлайхом (Jörg Schlaich). На вершину башни можно подняться по винтообразной лестнице одинакового ската, прикрепленной к

промежуточным площадкам, которые, в свою очередь, прикреплены к центральному пилону.

Тросовые оттяжки высоких мачт

Все материалы для оттяжек выполняются из особо прочной стали, опорные части конструкции, как правило, из железа и бетона. Здесь ярким примером мо-



Рис. 30. Мачта переизлучателя с вантовыми растяжками, http://vk.com/wall-13502584_2023



Рис. 31. Мачта с вантовыми оттяжками на покрытии здания

жет быть мачтовый переизлучатель во Владимирской области (рис. 30). Высота всей мачты – 330 м, вантовые растяжки крепятся к мачте через каждые 70 м.

Высокие мачты с тросовыми оттяжками могут устанавливаться не только на земле, но и на покрытии сооружений (рис. 31).

Висячие мосты

Висячие мосты разделяются на две основные группы (рис. 32). В мостах первой группы элемент ABC изготавливается из отдельных звеньев, объединенных в цепь (рис. 32, *а*). Цепь ABC вместе с оттяжками AD и EC и пилонами Aa ,

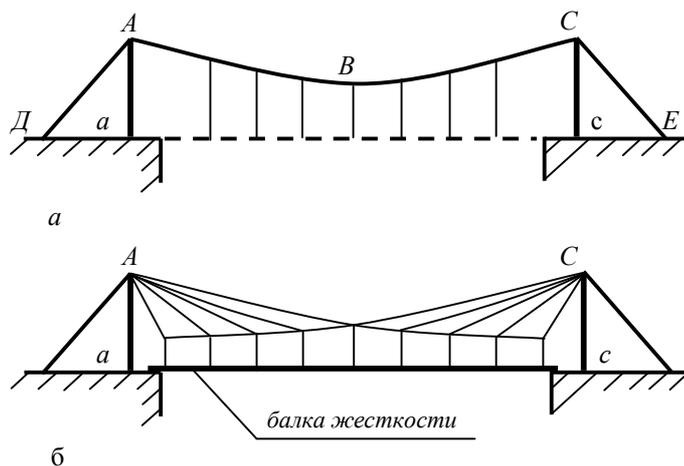


Рис. 32

Cc воспринимает всю нагрузку. В настоящее время элемент ABC делают из тросов, но название мостов этой группы – «цепной мост» – оставили прежним (рис. 33). Цепные мосты строили в Индии и Китае уже в I веке. Мосты второй группы (рис. 32, *б*) называют вантовыми мостами. Здесь нагрузку воспринимают раскосы и пояса. Вантовые висячие мосты разделяются на 3 группы: статически определимые вантовые фермы, статически неопределимые предварительно на-

прягаемые фермы без балок жесткости и статически неопределимые вантовые фермы с балками жесткости (рис. 32, б). Более подробную информацию о классификации висячих мостов, их конструктивных особенностях и методах расчета можно получить из книг [13, 14], а в данном разделе только укажем на существование таких вантовых структур, как «висячие мосты».



Рис. 33. Цепной мост Siduhe River Bridge, 2009 год. Длина главного пролета – 900 м, высота перекрываемого пространства - 496 м до дна ущелья.



Рис. 34. Вантовый висячий мост, соединяющий г. Владивосток и о. Русский

Сегодня самым высоким в мире подвесным мостом является мост, соединяющий г. Владивосток с островом Русский: вершина его главных опор - 327 метров. Здесь и самый длинный центральный пролет - 1104 метра. А общая протяженность натяжных тросов - вант составила почти 55 км (рис. 34).

Заключение

Висячие вантовые покрытия вдохновляют инженеров на протяжении многих лет. Однако вантовые системы все еще довольно новый тип конструкций покрытий. Сегодня вантовые конструкции признают инновационными конструктивными решениями, с помощью которых можно создавать впечатляющие геометрические формы и вместе с тем эффективно перекрывать большие пролеты сооружений. Интерес к вантовым покрытиям особенно усилился в связи с решением ФИФА о проведении в Российской Федерации чемпионата мира по футболу в 2018 году – ведь современные покрытия спортивных арен возводятся в основном с применением висячих вантовых и тросовых конструкций. Кроме того, в помощь архитекторам создано несколько компьютерных программ, облегчающих проектирование вантовых структур [15].

Естественно, не все вантовые структуры, созданные архитекторами и инженерами, можно причислить к тому или иному типу вантовых структур, пред-

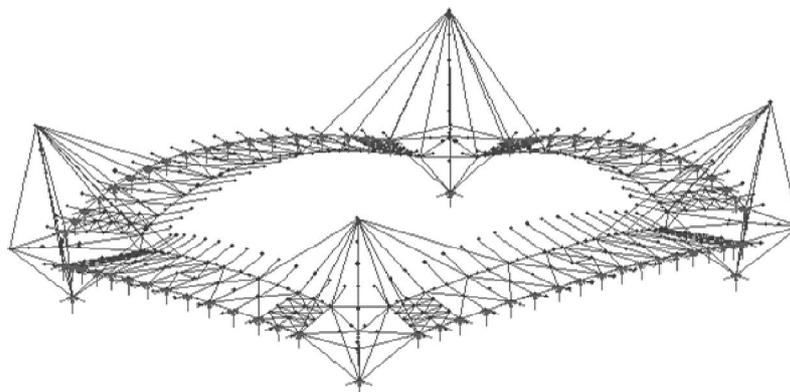


Рис. 35. Модель покрытия стадиона Chunu/Jeonju Stadium, Южная Корея [http://www.lusas.com]

ставленных в предложенной классификации. Например, покрытие над железнодорожными платформами в г. Тилбурге, Нидерланды, описанное в работе [10], с размером в плане $46,2 \times 147$ м состоит из 12 гипаров, часть углов которых опираются на железобетонные опоры, а другая часть углов поддерживается вантами. Или взять, например, покрытие стадиона (Chunu/Jeonju Stadium) в Южной Корее размером 260×160 м. Стадион был построен к чемпионату мира по футболу 2002 года. Покрытие подвешено к четырем мачтам высотой 63 м, установленным в углах (рис. 35) стадиона. Причем 4 ванта поддерживают свободный край длинной секции стадиона, а 3 – свободный край короткой секции. Еще 4 ванта являются стабилизирующими для каждой мачты. Использовались ванта диаметром 65 и 95 мм. С определенными оговорками эту структуру можно отнести к консольно-вантовым системам или ввести еще один, десятый, тип вантовой структуры «Подвесные вантовые покрытия с четырьмя стойками, расположенными в углах прямоугольного плана». Тогда к этому же типу можно отнести вантовую систему над трибунами стадиона, предложенную В.В. Ханджи и И.В. Лисицыным (рис. 36) [1].

Укажем также на существование арочно-вантовых комбинированных конструкций, которые практически не рассматривались в настоящей статье и не включены в предложенную классификацию. Часть из них представлены на рис. 1, см. предпоследнюю строку. В отличие от висячих вантово-арочных покрытий, арочно-вантовые комбинированные конструкции не являются висячими. Интересные примеры применения комбинированных арочно-вантовых конструкций в РФ приведены в статье Д.Б. Киселева [16].

Как показывают приведенные примеры, есть хорошие перспективы у всех типов вантовых конструкций, включенных в приведенную классификацию.

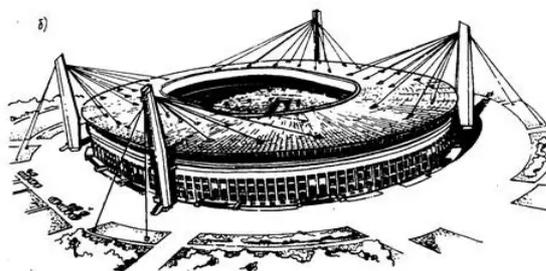


Рис. 36. Вантовая система с 4-мя пилонами над трибунами стадиона

Л и т е р а т у р а

1. *Голосов В.Н., Ермолов В.В., Лебедева Н.В. и др.* Инженерные конструкции: Уч. для вузов по спец. «Архитектура». – М.: «Высшая школа», 1991. – 408 с.
2. *Кривошапко С.Н.* Висячие тросовые конструкции и покрытия сооружений// Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 7 (34). – С. 51-70.
3. *Федулов В.К., Суладзе М.Д., Артемова Л.Ю.* Вантовые покрытия: Учебное пособие. – М.: МАДИ, 2014. – 48 с.
4. *Harris James B., Pui-K Li Kevin.* Masted Structures in Architecture. – Taylor & Francis, 1996. – 160 p.
5. *Скопенко В.А.* Тентовая архитектура: вчера, сегодня, завтра// Академический вестник УралНИИПроект РААСН. – 2010. - № 1. – С. 30-36.
6. *Кривошапко С.Н.* Тентовая архитектура// Строительство и реконструкция. – 2015. – № 3(59). – С. 100-109.
7. *Zordan Luigi, Morganti Renato.* Large roofs, large spaces. Suspended cable roofing in Italy 1948-1970// Proc. of the First Int. Congress on Construction History, Madrid, 20th-24th January 2003, pp. 2139-2148.
8. *Vintage British high tech// CMU Architecture.* – 2013. – Jule 09. [<https://cmuarch2013.wordpress.com/2009/07/09/vintage-british-high-tech/>].
9. *Kloiber L.A., Eckmann D.E., Meyer Th.R., Hautzinger St.J.* Design considerations in cable-stayed roof structures// North American Steel Construction: Conference: Modern Steel Construction. – March 2004. – 7 p.

10. Косенко И.С. Висячие конструкции покрытий. – М.: Стройиздат, 1966. – 88 с.
11. Changhua Wei and Yi Sun. Philosophy of structure: How Tensile Structure Works: <http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkcs/arch374/winter2002/psysisun/howtensileworks.htm>
12. Hennig Wanda. The man who built Durban's Moses Mabhida Stadium, 2012, <http://www.wandahennig.com/2012/10/the-man-who-built-durbans-moses-mabhida-stadium/>
13. Качурин В.К., Брагин А.В., Ерунов Б.Г. Проектирование висячих и вантовых мостов. – Изд-во «Транспорт», 1971. – 280 с.
14. Качурин В.К. Теория висячих систем. Статический расчет. – Л.: Госстройиздат, 1962. – 224 с.
15. Сыч С. Проектирование вантовых конструкций в Autodesk Robot Structural Analysis Professional// Cadmaster. – 2012. – № 6. – С. 84-86.
16. Киселев Д.Б. Арочно-вантовые комбинированные конструкции. Численные и экспериментальные исследования// Современное промышленное и гражданское строительство. – 2006. – Том. 2. - № 1. – С. 17-27.

References

1. Golosov, V.N., Ermolov, V.V., Lebedeva, N.V. et al (1991). *Injenernie Konstruktzii: Uch. dlya vuzov po spetz. "Arhitektura"*, Moscow: "Vysshaya Shkola", 408 p.
2. Krivoshapko, S.N. (2015). Suspension cable structures and roofs of erections, *Construction of Unique Buildings and Structures*, № 7 (34), p. 51-70.
3. Fedulov, V.K., Suladze, M.D., Artemova, L.Yu. (2014). *Vantovie Pokrytiya: Uch. Posobie*, Moscow: MADI, 48 p.
4. Harris J.B., Pui-K Li Kevin (1996). *Masted Structures in Architecture*, Taylor & Francis, 160 p.
5. Skopenko, V.A. (2010). Tent architecture: yesterday, today, tomorrow, *Akademicheskii Vestnik UralNIIProekt RAASN*, № 1, p. 30-36.
6. Krivoshapko, S.N. (2015). Tent architecture, *Stroitel'stvo i Rekonstruktsiya*, № 3(59), p.100-109.
7. Zordan Luigi, Morganti Renato. Large roofs, large spaces. Suspended cable roofing in Italy 1948-1970, *Proc. of the First Int. Congress on Construction History*, Madrid, 20th-24th January 2003, pp. 2139-2148.
8. Vintage British high tech// CMU Architecture. – 2013. – June 09. [<https://cmuarch2013.wordpress.com/2009/07/09/vintage-british-high-tech/>].
9. Kloiber, L.A., Eckmann, D.E., Meyer, Th.R., Hautzinger, St.J. (2004). Design considerations in cable-stayed roof structures, *North American Steel Construction: Conference: Modern Steel Construction*, March 2004, 7 p.
10. Kosenko, I.S. (1966). *Visyachie Konstruktsii Pokrytiy*, Moscow: Stroyizdat, 88 p.
11. Changhua Wei and Yi Sun. Philosophy of structure: How Tensile Structure Works: <http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkcs/arch374/winter2002/psysisun/howtensileworks.htm>
12. Hennig Wanda. The man who built Durban's Moses Mabhida Stadium, 2012, <http://www.wandahennig.com/2012/10/the-man-who-built-durbans-moses-mabhida-stadium/>
13. Kachurin, V.K., Bragin, A.V., Erunov, B.G. (1971). *Proektirovanie Visyachih i Vantovyh Mostov*, Izd-vo "Transport", 280 p.
14. Kachurin, V.K. (1962). *Teoriya Visyachih System, Sticheskiy Raschet*, L.: Gosstroyizdat, 224 p.
15. Sych, S. (2012). Design of cable-stayed structures in Autodesk Robot Structural Analysis Professional, *Cadmaster*, № 6, p. 84-86.
16. Kiselev, D.B. (2006). Combined (hybrid) arch-cable structures. Numeric and experimental researches, *Modern Industrial and Civil Construction*, Vol. 2, No 1, p. 17-27.

CABLE-STAYED STRUCTURES

S.N. Krivoshapko

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

Cable-stayed structures are simple in assembling, light in weight, safe in maintenance, and sometimes possess the architectural expressiveness. The well-known structures and buildings of all types which had practical importance and novelty, were marked by the rewards of professional association or were passed into the top lists of journals are presented in the paper. The author offered his own classification of cable-stayed structures containing nine types of considered structures.

KEY WORDS: suspended structures, cable-stayed structure, suspension cable-stayed structure, suspended cable roofing, stay, pylon, suspended bridge.