

Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spb.ru



Висячие тросовые конструкции и покрытия сооружений

С.Н. Кривошапко¹

Российский университет дружбы народов, 117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Информация о статье

УДК 624014

История

Подана в редакцию 26.05.2015

Ключевые слова

тросовые конструкции;
однопоясные тросовые покрытия;
двухпоясные тросовые покрытия;
висячие железобетонные оболочки;
висячие комбинированные покрытия;
соединение пересекающихся тросов;

АННОТАЦИЯ

Висячие тросовые конструкции просты в монтаже, надежны в эксплуатации, а в ряде случаев отличаются и архитектурной выразительностью. Представлены наиболее знаковые конструкции и сооружения, имевшие на момент строительства практическую значимость и но-визну, отмеченные наградами профессионального сообщества или вошедшие в рейтинги научных журналов. Несколько крупных аварий большепролетных тросовых покрытий не охладили интерес к ним со стороны архитекторов и конструкторов общественных и промышленных зданий.

Содержание

1.	Введение	52
2.	Виды и конструктивные особенности тросовых висячих покрытий и конструкций	53
3.	Примеры уникальных и выдающихся тросовых покрытий и конструкций	55
4.	Выводы	65

¹

Контактный автор:

+7 (916) 555 0221, sn_krivoshapko@mail.ru (Кривошапко Сергей Николаевич,)

1. Введение

В *висячих конструкциях* внешнюю нагрузку воспринимают тросы (стальной канат), кабели, цепи, прокатный металл и листовые мембраны, работающие только на растяжение. В *вантовых системах* ванты (нити) или тросовые плоские, или пространственные фермы поддерживают жесткие элементы (балки, плиты, арки, рамы), работающие на изгиб, в проектное положение, а уже на эти жесткие элементы укладываются ограждающие конструкции. *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 зависимости от формы, материала несущих элементов, их расположения, конструктивных особенностей, способа обеспечения жесткости пролетных несущих элементов висячие покрытия подразделяют *по очертанию в плане* (прямоугольные, круглые, овальные и сложной формы); *по расположению тросов или вант* (параллельное, радиальное и перекрестное); *по форме поверхности*, образуемой несущими элементами; *по виду применяемого несущего материала*, перекрывающего пролет (тросы, ванты, цепи, прокатный металл, мембраны); *по способу устройства покрытия и принятым расчетным схем* (висячие вантовые, висячие тросовые, висячие мембранные, висячие комбинированные с совместной работой гибких нитей и материала покрытия); *по способу стабилизации* конструкции покрытия от воздействия ветрового отсоса (пригрузением; ужесточением с помощью предварительного напряжения конструкции и омоноличивания оболочки покрытия; предварительным напряжением несущих тросов стабилизирующими тросами); *по взаимоположению несущих и стабилизирующих тросов* (однопоясные, у которых несущие и стабилизирующие тросы лежат в одной поверхности (рис. 1), но имеют кривизну разных знаков; двухпоясные, у которых несущие и стабилизирующие тросы расположены в разных поверхностях (рис. 2), причем несущие тросы всегда выгнуты книзу, а стабилизирующие – вверх).



Рисунок 1. Остекленный тросовый сетчатый фасад свободной формы: Rhön Klinikum, Бад-Нойштадт, Германия

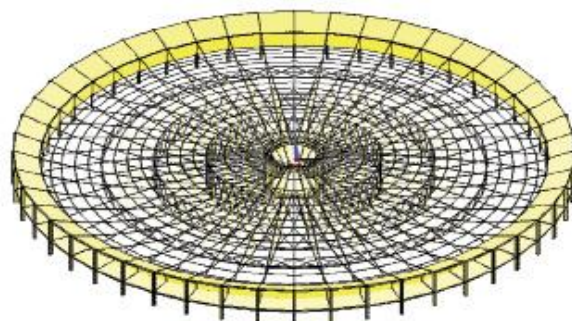


Рисунок 2. Вантовая двухпоясная система покрытия многофункциональной спортивно-зрелищной арены «Минск-Арена»

Тросовые и вантовые конструкции позволяют перекрывать пролёты более 200 м, однако обычно диапазон перекрываемых пролётов составляет 50-150 м.

ЦНИИСК им. Кучеренко предложил выделить в отдельную группу *металлические уникальные большепролетные сооружения*, к которым следует относить объекты, имеющие пролеты более 60 м при принципиально новых конструктивных решениях, требующих разработки специальных методов расчета, экспериментального исследования и т. п. и объекты пролетом более 100 м при конструктивных решениях, успешно опробованных в практике проектирования, строительства и эксплуатации. «Такие сооружения

имеют повышенный уровень ответственности, их отказы могут привести к тяжелым экономическим и социальным последствиям. В связи с этим следует учитывать дополнительные требования к номенклатуре и объемам изысканий и проектных работ, изготовлению и монтажу конструкций, правилам их приемки и эксплуатации. Проектирование должно основываться на выборе рациональных конструктивных решений, увязанных с функциональным назначением, архитектурой, методами изготовления и монтажа, условиями эксплуатации. Выдвигаемые идеи должны быть технически и экономически обоснованы» [1].

В работе [2] рассмотрены различные подходы к определению сооружений, которые можно было бы назвать выдающимися. Учитывая, что в XXI веке в силу ряда причин [3] возрастает интерес к проектированию и строительству большепролетных сооружений [4], висячим конструкциям, в том числе висячим тросовым конструкциям, должно быть уделено повышенное внимание, тем более, что согласно выводам работ [1-4], практически все сооружения этого типа можно назвать уникальными и выдающимися.

Целью же данной статьи является показ возможностей тросовых конструкций для перекрытия больших пролетов при малом расходе металла, подчеркивание архитектурной выразительности и многообразия форм рассматриваемых объектов, привлечение ученых, занимающихся композитами, к использованию новых конструктивных материалов для несущих нитей тросовых сооружений.

2. Виды и конструктивные особенности тросовых висячих покрытий и конструкций

Основные достоинства висячих тросовых и вантовых конструкций заключаются в эффективном использовании всей площади поперечного сечения растянутых элементов при восприятии внешних нагрузок и поэтому оправдано применение высокопрочных сталей, что существенно уменьшает расход стали на единицу площади сооружения; при монтаже не требуется устройство лесов и подмостей, что приводит к снижению стоимости покрытия; гибкие стальные канаты, ленты при транспортировке могут быть свернуты в бухты, рулоны; нет необходимости проводить расчет конструкции на устойчивость.

Недостатки тросовых висячих конструкций будут указываться по ходу изложения материала.

В статье рассмотрим только висячие тросовые конструкции и комбинированные тросово-вантовые структуры с возможным включением в их состав жестких элементов.

Однопоясные покрытия получили наибольшее распространение вследствие своей технологичности в изготовлении, простоты в монтаже (рис. 1). Ими можно перекрывать пролеты до 100 м и придавать сооружению самую различную форму. В *двухпоясных покрытиях* стабилизация поверхности висячих покрытий может быть достигнута устройством двойной системы вант (рис. 2). Верхние и нижние ванты закрепляют анкерами в одном жестком железобетонном кольце. Между обеими системами вант предусмотрен распорный барабан или стоечные распорки, размещаемые между вантами (рис. 3).



Рисунок 3. Трубчатая стойка между несущими и стабилизирующими вантами

Тросовые сетки представляют собой висячую систему, состоящую из двух семейств взаимно пересекающихся гибких нитей и образующих четырехугольные, близкие к квадратным ячейки. Нити одного семейства провисают и являются несущими, другого – стабилизирующие, имеют кривизну противоположного знака. В работе [5] указывается, что под действием некоторых нагрузок (ветер, сейсмическая нагрузка), не совпадающих по направлению с гравитационными нагрузками, в ортогональной тросовой сети сооружения на эллиптическом плане могут возникнуть сжимающие усилия, поэтому необходимо предусмотреть предварительное натяжение тросов, которое могло бы погасить сжимающие усилия. Оказывая при предварительном натяжении взаимное давление друг на друга, они образуют единую седловидную поверхность, т.е. поверхность отрицательной гауссовой кривизны. В силу этого сеть обладает кинематической неподвижностью и не нуждается в пригрузке, так как нагрузки гравитационного происхождения воспринимают несущие нити, а ветровой отсос – стабилизирующие.

К недостаткам тросовых конструкций можно отнести большую деформативность от местной нагрузки и наличие значительного распора. Тросовые конструкции достигают необходимой жесткости и устойчивости путем придания несущим тросам предварительно напряженного состояния через узлы их крепления. Поскольку эти конструкции - необычайно легкие и обладают минимальной собственной массой конструкции, то именно у плоских тросовых фасадов появляется относительно большие прогибы в перпендикулярном направлении к первоначальной плоскости лицевого участка фасада (рис. 4). Эти деформации не опасны для собственно тросовой конструкции, однако стекла, закрепленные на тросовую сеть, вынуждены следовать всем движениям в точках их фиксации. Архитектурная группа «Lamm, Weber, Donath & Partner» применила тросовый сетчатый остекленный фасад в форме поверхности отрицательной гауссовой кривизны (рис. 1) для здания клиники Rhön Clinic в Бад-Нойштадте (Bad Neustadt), Германия. Тросовая сеть покрывает пространство между различными зданиями, и это была первая в мире стальная тросовая сеть, остекленная силикатным стеклом. Детали крепления стекла выполнены с помощью клипс из стальных изогнутых стержней, установленных в узлах пересечения тросов различных семейств.



Рисунок 4. Остекленная тросовая фасадная структура: новый международный аэропорт Suvarnabhumi в Бангкоке, Таиланд (проектирование фасада: Werner Sobek Ingenieure)

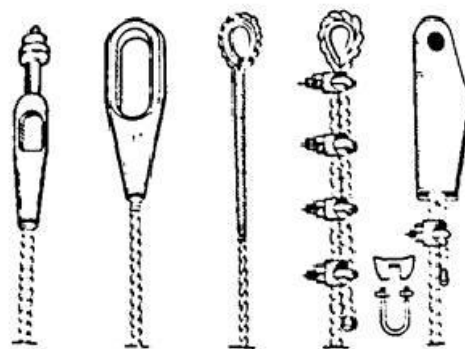


Рисунок 5. Типы концевых креплений вант из канатной проволоки

Тросы из стержневой стали проще всего закрепить при помощи нарезных хвостовиков, снабженных гайкой. В России канаты из параллельных пучков высокопрочной проволоки рекомендуется закреплять при помощи гильзостержневых анкеров типа НИИ-200 (рис. 5), заливаемые специальным сплавом с температурой плавления около 45°C , а ванты из мощных пучков – при помощи анкеров стаканного типа с забетонированными загнутыми концами проволок. Оба эти типа анкеров широко применяются в предварительно напряженных конструкциях, хорошо известны и проверены на практике. В тросовых сетях необходимо соединять пересекающиеся тросы. Конструкция такого соединения должна обеспечивать взаимную неподвижность вант в плоскости покрытия (рис. 6, рис. 7).

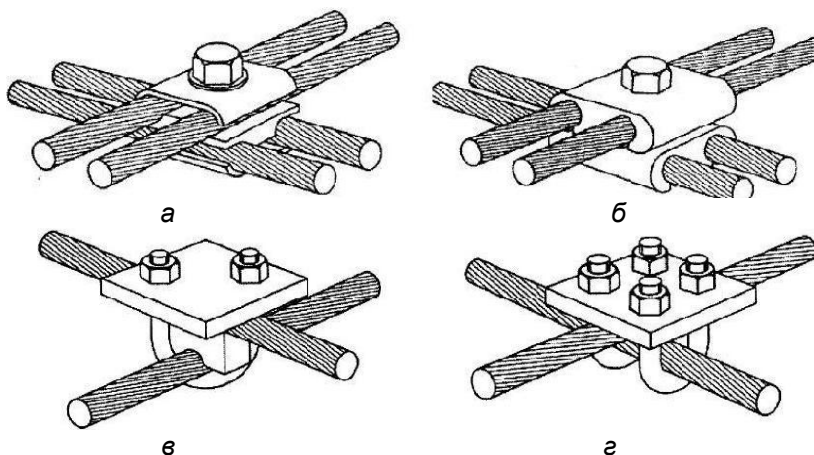


Рисунок 6. Соединение пересекающихся тросов [6]

а – зажим для соединения парных пересекающихся тросов, устанавливаемый в процессе монтажа; б – зажим для соединения парных пересекающихся тросов, устанавливаемый в заводских условиях; в – соединение двух пересекающихся тросов с помощью U-образного болта; г – соединение двух пересекающихся тросов с помощью двух U-образных болтов

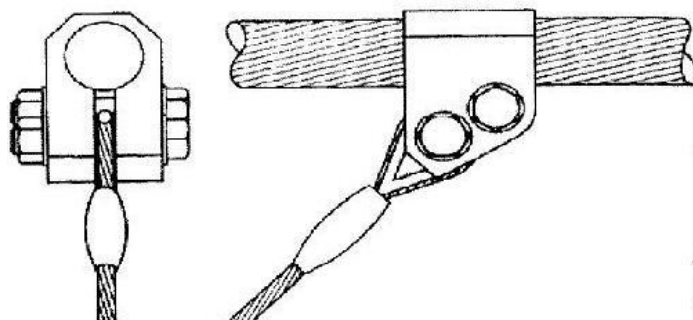


Рисунок 7. Деталь крепления троса сети к краевому (граничному) тросу

Разновидности тросов, варианты опорных узлов тросовых структур, экспериментальные методы исследования тросовых структур в аэродинамических трубах, порядок возведения тросовых структур подробно исследуются в работе [7].

Приведенная классификация висячих конструкций не охватывает всего их многообразия. Существует довольно много классификаций и разделений висячих покрытий и конструкций, предложенных различными авторами, например [8, 9]. В зарубежной научно-технической литературе любые тентовые конструкции также относят к висячим конструкциям [10]. Мы же предлагаем относить к висячим тросовым конструкциям, только те тентовые сооружения, где тент располагается на системе тросов (тросовой сетке).

3. Примеры уникальных и выдающихся тросовых покрытий и конструкций

В книге [8] отмечается, что до 1977 года только в СССР было построено свыше 120 зданий, перекрытых висячими конструкциями, поэтому в рамках одной статьи невозможно даже просто перечислить наиболее интересные висячие покрытия. Неизбежно будет что-нибудь пропущено. Необходимо также напомнить современным исследователям, что многие важные инженерные решения по висячим конструкциям были предложены уже в начале второй половины прошлого века.

Первые висячие конструкции тросового типа из узких железных полос были сооружены В.Г. Шуховым в 1896 г. на Нижегородской ярмарке. Крупным шагом в развитии висячих конструкций явилось сооружение в 1953 г. покрытия крытой арены стадиона 92 × 97 м в г. Раллей (Северная Каролина, США, рис. 8). Здесь Мэтью Новицкий впервые внедрил сетки из тросов.

В Советском Союзе строительство висячих конструкций началось в 1958-1960 годах со строительства в Баку летнего кинотеатра и детского театра с покрытием в форме гипара размером 20×30 м по проекту Бакгипрогора. Одной из первых конструкций в виде однопоясной сетки из тросов, возведенной в нашей стране в 1960 г. в Таллинне по чертежам Эстонпроекта, является висячий навес пролетом 75 м над эстрадой Певческого поля. Овальная в плане поверхность навеса близка по форме к гипару, образована сеткой из стальных тросов с шагом 3 м и покрыта деревянными щитами. Фасадная навесная арка – забетонированная стальная труба диаметром 2 м [8].



Рисунок 8. Крытая арена «Livestock Pavilion» в г. Ралей, США

Висячие железобетонные оболочки надежнее выпуклых оболочек с точки зрения устойчивости, поэтому отношение радиуса кривизны к толщине плиты покрытия может достигать 1/1000. Первая в СССР железобетонная висячая оболочка (круглая в плане диаметром 40 м) сооружена в 1962-1963 годах в Еманжелинске по проекту Ленпромстройпроекта для цементного завода. Висячие железобетонные оболочки должны быть предварительно сжаты. Жесткость этих покрытий обеспечивается навеской плит или пригрузкой балластом. Под действием нагрузки нити-растяжки растягиваются. В это время швы между плитами омоноличивают, стыки заваривают. За счет упругих деформаций нитей происходит обжатие плит, и конструкция начинает работать как монолитная оболочка. Напряжения от предварительного сжатия должны быть на 20-25% больше напряжений от временной нагрузки. В этом случае бетон оболочки будет всегда сжат.

В 1963-1964 годах в Красноярске по чертежам того же Ленпромстройпроекта построена железобетонная сборная висячая оболочка пролетом 78 м над закрытой стоянкой гаража (рис. 9). Стрела провеса – 6,8 м. Железобетонный настил опирается на нити из круглого проката с шагом 1,5 м. При строительстве гаража для передачи распора в грунт предусмотрены опоры в виде стоек с заанкерёнными оттяжками. Пространство между наклонным ограждением и стойками было использовано для размещения вспомогательных служб. Небольшой уклон кровли обеспечивает свободное стекание дождевой воды.

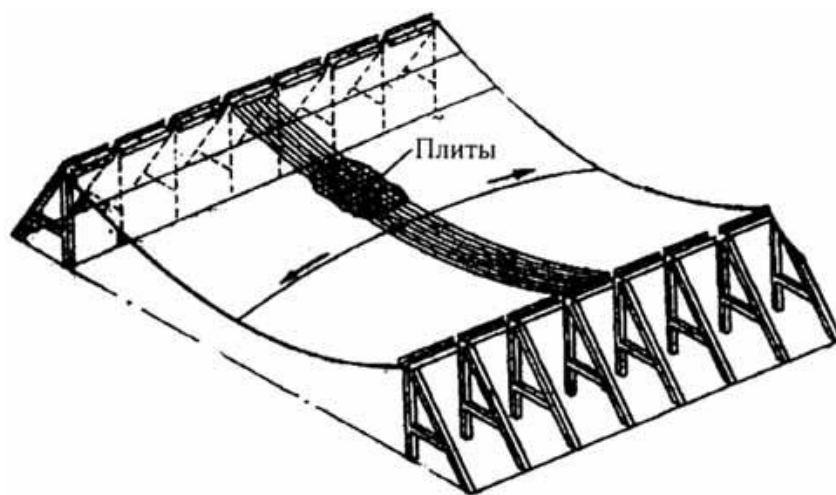


Рисунок 9. Схема расположения вант и укладки сборных железобетонных плит над стоянкой гаража 78×84 м, 1963-1965

Интересно решение покрытия Новосибирского государственного цирка в виде перекрестных тросов, на которые устанавливаются железобетонные плиты. Полученная форма покрытия представляет собой гиперболический параболоид.

Автобусный гараж в г. Новгороде имеет шатровое висячее тросовое покрытие (рис. 10) опирающееся в середине на стойку (рис. 11) при помощи металлического кольца и несущих нитей из прокатной стали диаметром 40 мм. Дополнительную информацию о тросовых висячих покрытиях шатрового типа над автобусными гаражами и крытыми рынками можно найти в работе [11].



Рисунок 10. Автобусный гараж в г. Новгороде, 1966 г.

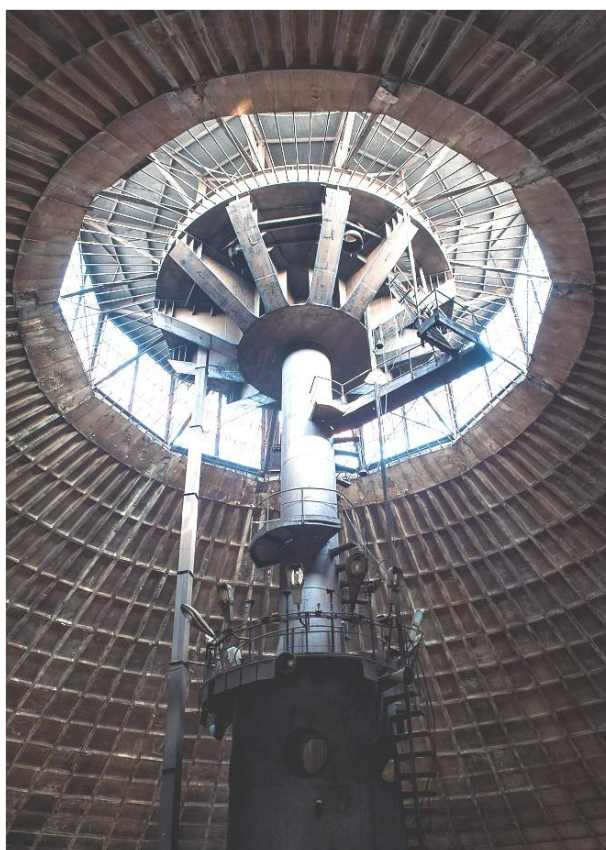


Рисунок 11. Центральная стойка автобусного гаража в г. Новгороде

Дворец спорта «Юбилейный», торжественно открытый в 1967 году, это – многофункциональный комплекс со зрительным залом, который в зависимости от трансформации может вмещать от 6500 до 10000 зрителей (рис. 12) [12]. В 1971 году авторы здания были удостоены Государственной премии СССР (Архитекторы Г. П. Морозов, И. П. Сусликов, А. Я. Левханьян, Ф. Н. Яковлев, инженеры А. П. Морозов и др.).



Рисунок 12. Дворец спорта «Юбилейный» (1967, Ленинград)



Рисунок 13. Кинотеатр «Океан», Владивосток

Кинотеатр «Океан» во Владивостоке открылся в 1969 году как первый широкоформатный кинотеатр на Дальнем Востоке (рис. 13). Покрытие – висячая оболочка на эллиптическом плане. В центре покрытия находится стальное кольцо, наружный контур которого выполнен из монолитного железобетона. Проект кинотеатра разработан в московском институте Гипротئاتр архитекторами Г. К. Мачульским и Б. И. Левшиным.

Практически в те же годы началось строительство висячих оболочек за рубежом, преимущественно для покрытия общественных и спортивных зданий.

Одним из первых тросовых сооружений стала крытая хоккейная площадка, запроектированная Е. Саариненом (E. Saarinen) и построенная в 1958 г. Эта замечательная тросовая структура в форме поверхности отрицательной гауссовой кривизны создается центральной криволинейной железобетонной аркой пролетом 90 м и тросами, проходящими через арку и закрепленными на опорах по обе стороны от арки (рис. 14). По тросам уложено деревянное покрытие. Это сооружение Американским институтом архитекторов (American Institute of Architects) включено в 2007 году в список знаменитых сооружений США.



Рисунок 14. Спортивное сооружение, New Haven, Connecticut, USA (фото Carol M. Highsmith)



Рисунок 15. Многофункциональное спортивное сооружение «Scandinvium», открыто в 1971 г., Gothenburg, Швеция



Рисунок 16. Спортзал в префектуре Кагава, Япония, 1964 г.

Для перекрытия зданий прямоугольной формы, где длина намного превышает его ширину, стали использовать тросовые покрытия одинарной кривизны с параллельным расположением несущих тросов. Часто это были многопролетные односкатные или двухскатные висячие покрытия. Так как усилия в тросах не зависят от числа пролетов, то такая конструкция экономически оправдана. Первая многопролетная тросовая конструкция была применена в 1954-1957 гг. для навесов над перронами в Австрии. В 1959 году в Дортмунде, ФРГ, висячая оболочка применена для перекрытия выставочного прямоугольного зала пролетом 80 м. Эффективное *висячее покрытие шатрового типа* диаметром 160 м над резервуаром для воды сооружено в Дурбане (ЮАР) в 1971 г. Отметим, что на подрабатываемых территориях в СССР также строилось много резервуаров для воды с шатровыми покрытиями диаметром до 36 м.

Сетчатое однопоясное покрытие над выставочным залом в г. Оклахома-Сити, США, возведено в форме эллиптического параболоида на эллиптическом плане с размерами в осях $122 \times 97,5$ м, с сеткой несущих тросов $3,05 \times 3,05$ м и настилом из легкобетонных плит.

Многофункциональное спортивное сооружение «Scandinavium» в Готенбурге, Швеция, архитектор Poul Hultberg, имеет овальную форму в плане. Покрытие в форме гипара поддерживается предварительно напряженными тросами, установленными через 4 м в обоих направлениях и заанкеренными в железобетонной контурной балке прямоугольного поперечного сечения $3,5 \times 1,2$ м (рис. 15). Криволинейная балка опирается на 40 круглых колонн и 4 пилон, которые хорошо просматриваются на фасаде. На момент строительства это была самая большая крытая спортивная арена в Северной Европе вместимостью 14000 зрителей.

Самый влиятельный японский архитектор XX века Кендзо Танге также использовал тросовые висячие сетки для перекрытия большого пролета спортивного комплекса в префектуре Кагава, Япония (рис. 16).

Дворец спорта в Милане, Италия, стал достопримечательностью благодаря обрушению своего покрытия в 1985 г., которое стало одной из крупнейших аварий среди висячих тросовых сооружений. Сооружение, построенное в 1975 г., было перекрыто круглым в плане висячим покрытием диаметром 126 м в форме гиперболического параболоида (рис. 17). Несущая конструкция выполнена в виде ортогональной сетки из стальных канатов диаметром 45 мм, закрепленных в кольцевой балке опорного контура. Максимальное провисание канатов составило 10,7 м. В результате сильной снежной бури на покрытии образовался слой снега толщиной 750 мм. Такая снеговая нагрузка, в сочетании с сильным ветром, резким падением температуры вызвала деформации, приведшие к разрушению балки контура. Четыре секции контура значительно деформировались, две разрушились полностью. По действующим итальянским нормам снеговая нагрузка была принята 0,9 кПа, в то время как реальная нагрузка составила около 1,3-1,5 кПа. Несущая способность покрытия была принята в расчете с коэффициентом запаса 1,5, а в действительности этот коэффициент оказался ниже. Причиной аварии стал тот факт, что характер работы такой сложной конструкции не был точно определен из-за отсутствия опыта строительства таких уникальных сооружений. После аварии сооружение стало непригодным для эксплуатации, а в 1986 году был открыт новый спорт-комплекс.



Рисунок 17. Дворец спорта в Милане до разрушения (Palasport di San Siro), 1975 [skyscrapercity.com]

В России также произошла крупнейшая авария однопоясного тросового покрытия. Висячая оболочка покрытия Басманного (Бауманского) рынка была возведена в 1977 г., гл. архитектор Л. Гильбурд, конструктор перекрытия Н.В. Канчели. Это покрытие - круглое в плане с радиальным расположением тросов и со сборно-монолитным железобетонным наружным и металлическим внутренним кольцами. Перекрытие обрушилось 23 февраля 2006 г. (рис. 18). По итогам заключения комиссии московского правительства причиной обрушения явились грубые нарушения правил эксплуатации здания.

Обзор будет неполным, если не упомянуть самое большое тросовое покрытие Madison Square Gardens, Нью-Йорк, США (рис. 19), без единой опоры внутри кругового здания, что дает хороший обзор для каждого из 20234 зрителей. Для оцинкованных тросов радиального размещения была применена высоко-

прочная сталь, у которой прочностные характеристики в 3-4 раза больше, чем у стандартных сталей. Внешнее кольцо опирается на 48 стальных колонн. По мнению авторов юбилейной статьи, [4] это сооружение является знаменитым пространственным сооружением современности и свидетельством достижений строительной механики.



Рисунок 18. Обрушение Басманного рынка 23.02.2006 г., Москва



Рисунок 19 Зрелищно-спортивное сооружение «Madison Square Garden» в Нью-Йорке, США, открытие 11 февраля 1968 г.

Тросы круглого в плане покрытия стадиона в Малайе натянуты между кольцевой железобетонной балкой диаметром 85 м и стальным кольцом, расположенным в центре. При сильном тропическом ливне нагрузка от воды на кровле достигала большой величины и в центре покрытия появлялся прогиб равный 12,7 см. Это сооружение известно тем, что здесь панели покрытия крепятся не к тросам непосредственно, а к деревянным прогонам, уложенным по стальным канатам, что обеспечило возможность свободного перемещения панелей покрытия при удлинении тросов. Круглое покрытие состоит из облицованных поливинилхлоридом гладких и перфорированных панелей размером 0,6 × 1,2 м.

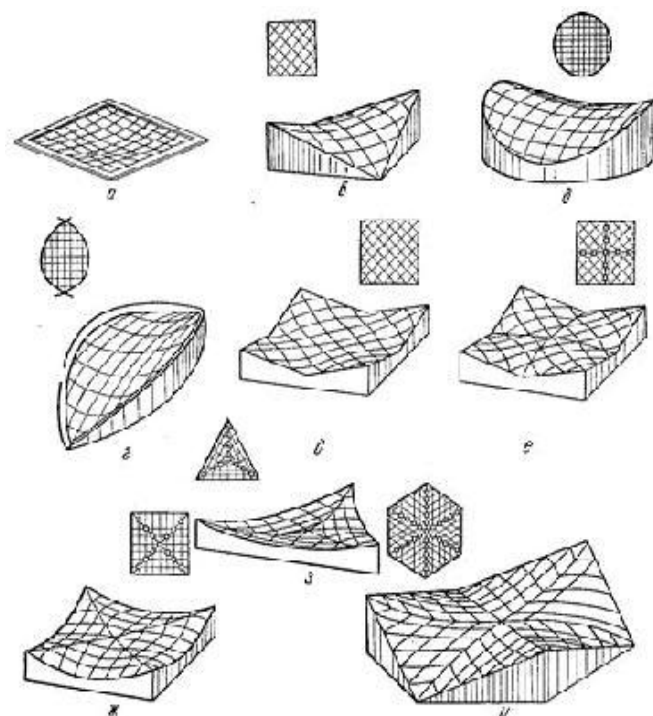


Рисунок 20. Тросовые сети покрытий

а – ортогональная на плоском контуре; б, в, г – ортогональная гиперболического параболоида соответственно на квадратном, круглом и ограниченном двумя кривыми плане; д – ортогональная на симметричном пространственном контуре; е – то же, с тросами жесткости; ж, з, и – ортогональная с тросами жесткости соответственно на квадратном, треугольном и шестиугольном планах.

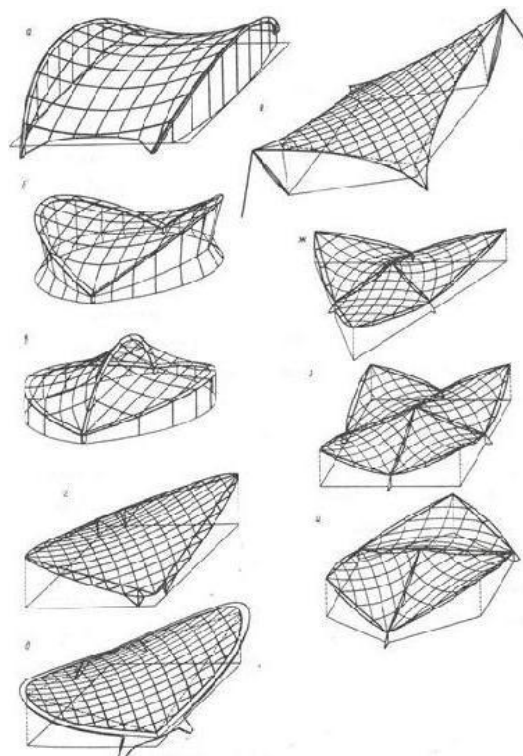


Рисунок 21. Тросовые сетки седловидной поверхности с опорным контуром

На рис. 20 и рис. 21 представлены некоторые тросовые сети покрытий, которые были применены в реальных сооружениях. Впервые тросовые сети рассмотрены А.П. Сеницыным [13]. Практические способы расчета тросовых сетей даны В.К. Качуриным [14].

Круг и эллипс являются наиболее благоприятными фигурами для радиальных тросовых сетей. Однако такие очертания предопределяют форму здания, что не всегда может соответствовать его функциональному назначению. При применении тросовой сети вогнутого типа, например в форме параболоида вращения или эллиптического параболоида, возникают трудности с отводом атмосферных осадков с покрытия. Такие покрытия, как правило, имеют сложный внутренний водоотвод. Первое вогнутое радиальное покрытие появилось в 1956 г. по проекту архитектора Риоса в Монтевидео (Уругвай) для стадиона круглой формы в плане диаметром 94 м. Жесткость покрытия была обеспечена предварительным напряжением кровли путем временного пригруза железобетонных плит кирпичом.

Считается, что повышение жесткости тросовых конструкций достигается как увеличением веса настила, так и его омоноличиванием, превращающем систему в висячую оболочку, а при легких настилах – введением вантовых оттяжек, как это сделано, например, в складском здании с трехпролетным висячим покрытием, представленном на рис. 22.

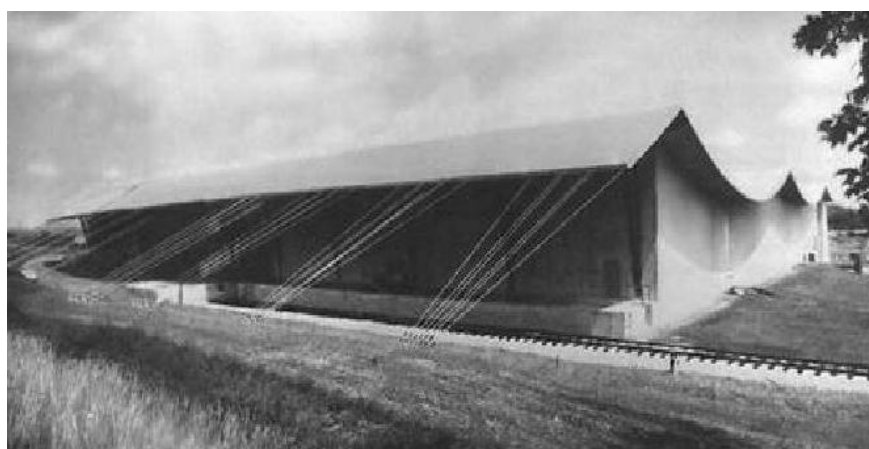


Рисунок 22. Складское здание с трехпролетным висячим покрытием

Выше приведены примеры висячих тросовых покрытий сооружений, реально построенных до 1977 года. Дополнительные сведения о тросовых висячих конструкциях того времени можно получить в небольшой по объему, но насыщенной иллюстративным материалом книге И.С. Косенко [15]. Необходимо отметить, что в то время активно проводились и теоретические исследования по определению напряженно-деформированного состояния висячих тросовых структур [16-18], частот собственных колебаний тросовых сетей [19], по вычислению величины предварительного напряжения висячих тросовых покрытий [20], формообразованию тросовых сетей на поверхности [21]. И.Л. Ружанский [22] провел анализ тенденций развития конструктивных форм большепролетных покрытий висячего типа, а В.Г. Штолько с коллегами [23] обобщил опыт проектирования и строительства железобетонных висячих оболочек, построенных до 1980 года.

Рассмотрим примеры реализованных тросовых покрытий наиболее интересных сооружений конца XX и начала XXI века.

Как уже отмечалось выше, висячие комбинированные покрытия с совместной работой гибких нитей и материала покрытия составляют один из видов висячих покрытий. Это могут быть тонколистовые мембранные покрытия с гибкими и жесткими несущими нитями, по которым укладывают ограждающие кровельные конструкции из профилированного стального настила или из сборных железобетонных элементов. Используется также монолитный вариант железобетона [24]. В период возведения таких оболочек рабочими элементами ее пролетной конструкции служат стальные канаты. В некоторых сооружениях поверх тросов укладывают рулонный материал, например, «стилтекс». Эта рулонная водонепроницаемая пленка, армированная сеткой из оцинкованной стальной проволоки, выполняет роль опалубки. Прочность и жесткость этой пленки позволяют рабочим ходить по ней после раскатки материала. После замоноличивания в эксплуатационной стадии оболочка работает совместно с тросами. Возможны комбинированные системы висячих покрытий – тонколистовые мембраны, подкрепленные системой гибких или жестких нитей в виде балок, прогонов, ферм или стальных полос.

Выставочный комплекс «Белэкспо», Минск (Белоруссия) введенный в эксплуатацию в 1988 году, архитектор – академик РААСН Л.В. Москалевич, имеет форму зонтичной поверхности с пятью лепестками в виде гипаров (рис. 23). Здесь бетон укладывался набрызгом на ванты. Помимо зонтичной поверхности сооружение известно современной системой аварийного освещения серии BS-ELECTRO и уникальной активной молниезащитой производства компании «ERICO», США, при участии ООО «Интербелтрейд», г. Минск, установленными при реконструкции комплекса в 2011 г.



Рисунок 23. Выставочный комплекс «Белэкспо», Минск (Белоруссия)



Рисунок 24. Крытый рынок в Киеве по ул. Верхний Вал с одноярусным цилиндрическим висячим тросовым покрытием

Несущие нити крытого рынка в Киеве выполнены из двух стальных стержней диаметром 40 мм. Шаг несущих стержней – 2 м. Проект выполнен КиевЗНИИЭП, построен в 1982 году (рис. 24). Расход стали составил всего 42,3 кг на 1 м² покрытия.

Наиболее известное висячее покрытие за рубежом, в котором роль несущих элементов играют канаты, а железобетонные панели являются ограждающими элементами, это – седлообразное покрытие стадиона в Калгари (PENGROWTH SADDLEDOME), Канада (рис. 25). Стадион был открыт 15 октября 1983 года, а строили его для Зимних Олимпийских игр 1988 года. За ряд инженерных решений и новизну в архитектуре проектировщики этого сооружения получили несколько наград и в 2008 году были отмечены призом Королевского архитектурного института Канады (Royal Architectural Institute of Canada). До 2008 года стадион в Калгари считался самым длинным железобетонным гипаром. Это сооружение за 32 года своего существования 4 раза меняло свое название: Olympic Saddledome (1983-1995), Canadian Airlines Saddledome (1995-2000), Rengrowth Saddledome (2000-2010) и Scotiabank Saddledome (после 2010 г.).

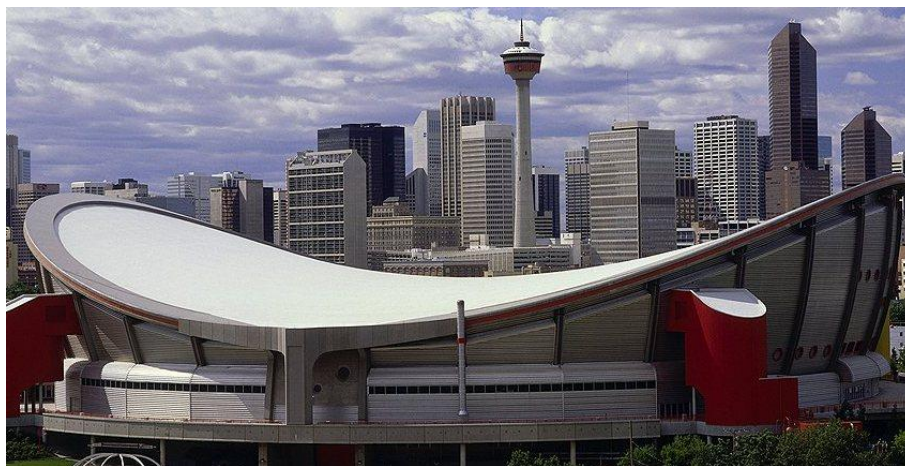


Рисунок 25. Стадион в Калгари, Канада, арх. Graham McCourt Architects, инж. Jan Bobrovski and Partners.

В наших российских климатических условиях расчетная временная нагрузка (снег) может в 3 раза превышать постоянную нагрузку. При таких соотношениях нагрузок деформации тросов будут достигать больших величин. Например, для тросового покрытия диаметром 100 м упругий прогиб от снеговой нагрузки может быть равен 1-1,25 м. Утяжеление вантовой конструкции ставит вопрос об экономической целесообразности возведения такого типа сооружения, поэтому у нас лучше себя показывают преднапряженные железобетонные оболочки на основе тросовых систем.

Первое современное большепролетное вантовое двухъярусное покрытие в Белоруссии выполнено из высокопрочных канатов в виде «велосипедного колеса» диаметром 116,0 м в осях колонн (рис. 2). Нижние, несущие, ваны состоят из 27 прядей диаметром 15,7 мм, а каждая из них – из 7 высокопрочных арматурных оцинкованных проволок диаметром 5,2 мм, находящихся в защитной оболочке из полиэтилена высокой плотности. Общий диаметр нижней ваны 120 мм; расчетная несущая способность одной пряди 14 тонн, нижней ваны – 378 тонн; разрывное усилие пряди 28 тонн, нижней ваны – 756 тонн. Каждая из верхних, стабилизирующих, вант диаметром 50 мм состоит из 7 прядей диаметром 15,7 мм. Между несущими и стабилизирующими вантами при помощи металлических хомутов установлены металлические трубчатые стойки диаметром 159 мм разной длины, которые создают форму покрытия, обеспечивающую внутренний водосток (рис. 3). Нижние несущие ваны имеют траекторию кубической параболы и закрепляются на металлические упоры, расположенные на верхнем внешнем монолитном железобетонном кольце диаметром 116 м и нижнем внутреннем металлическом кольце диаметром 12 м в осях. Верхние, стабилизирующие, ваны с траекторией квадратной параболы закрепляются на металлические упоры, которые находятся на нижнем внешнем монолитном железобетонном и внутреннем металлическом кольцах (рис. 26). По верху стоек – выше уровня верхних вант – укладываются металлические плиты покрытия в форме трапеций. Их размеры меняются по мере приближения к внутреннему металлическому кольцу (рис. 2).

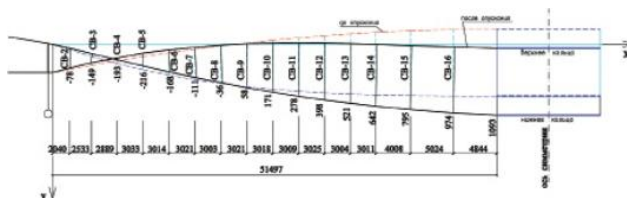


Рисунок 26. Расчетная схема нижних несущих и верхних стабилизирующих вант

Небольшой летний театр с тросовым покрытием (рис. 27) построен в парке Глобы Днепропетровска. Несущая конструкция покрытия с размерами в плане 47 × 46 м состоит из двух наклонных металлических арок замкнутого прямоугольного сечения, поддерживающих сетку из ортогонально расположенных в плане тросов. Наклонные арки образуют опорный контур покрытия. Несущая система покрытия состоит из несущих тросов, очерченных по параболе, и ортогональных им стабилизирующих тросов. Вместе они образуют поверхность гиперболического параболоида. Впервые для подобных конструкций в качестве жесткого диска использованы металлические наклонные арки вместо железобетонных.



Рисунок 27. Летний театр в парке Глобы, Днепропетровск, Украина

Несомненно, одним из самых экзотических сооружений последних лет стал гигантский «Хан Шатыр», который является самым большим шатром в мире (рис. 28). Высота центрального столба – 150 м, общая площадь 127000 м². Этот торгово-развлекательный центр можно считать висячим тросовым сооружением, так как его покрытие формируется сетью стальных тросов, подвешенных к центральному столбу. Тросы накрыты полимерным покрытием ETFE, которое в России выпускается под маркой «Фторопласт-40». Этот второй проект Н. Фостера в Астане по версии журнал Forbes Style входит в десятку лучших экологических зданий в мире.



Рисунок 28. Ханский шатер, Астана, Казахстан, открыт в июле 2010 г.

Классическое висячее тросовое покрытие Центра Собраний Д.Л. Лоуренса в Питсбурге, США (рис. 29), подвешено на 15 толстых параллельных тросах к мачтам, стоящим снаружи. Центр официально открыт в 2003 году. Покрытие центра можно отнести одновременно и к вантовым висячим конструкциям, т.к. предусмотрены открытые вантовые оттяжки, идущие к наружным мачтам. Этому зданию было присуждено несколько премий, например, высшая премия Института инженеров по строительной механике (Institution of Structural Engineers) за отличную работу строительных конструкций в здании (2004 г.), кроме того Центру было присуждено 6-е место как самому большому экологическому зданию в США.



Рисунок 29. Центр Собраний Д.Л. Лоуренса в Питсбурге, США (David L. Lawrence Convention Center), арх. Р. Виноли (R. Vinoly)

По-видимому, последним по времени возведения стал однослойный тросовый навес размером 38×55 м в Вольфсбурге, ФРГ (рис. 30). Оригинальная конструкция, опирающаяся на две бетонные сваи длиной 20 м, запроектирована специалистами Schlaich Bergemann & Parthner. Сверху по тросам уложена стеклоткань с тефлоновым покрытием, пропускающая 12% солнечного света, поэтому искусственное освещение не требуется. Кроме того, стеклоткань обладает эффектом самоочистки. Пока конструкция аналогов не имеет.

Отметим еще одну область применения тросовых висячих конструкций. В ФРГ разработаны проекты тросовых конструкций вытяжных башен градирен (рис. 31), обладающих более высокими технико-экономическими показателями, чем традиционные железобетонные конструкции. Основными конструктивными элементами тросовой градирни являются преднатяженные стальные канаты, размещенные в меридиональном и диагональном направлениях (рис. 32). Вантовая градирня высотой 146 м с алюминиевой обшивкой построена в г. Шмехаузен (ФРГ). Для придания башне традиционной формы однополостного гиперboloида вращения потребовалась большая точность разметки вант и напрессовка на них специальных крепежных деталей, но даже в этом случае из-за неравномерной вытяжки тросов возможны отклонения от проектной формы, а, следовательно, и неравномерные усилия в вантах.



Рисунок 30. Перекрытие парковки комплекса Volkswagen Austostadt, Вольфсбург, ФРГ, построено в 2012-2013 гг.



Рисунок 31. Тросовая башня градирни с центральным пилоном (Германия)

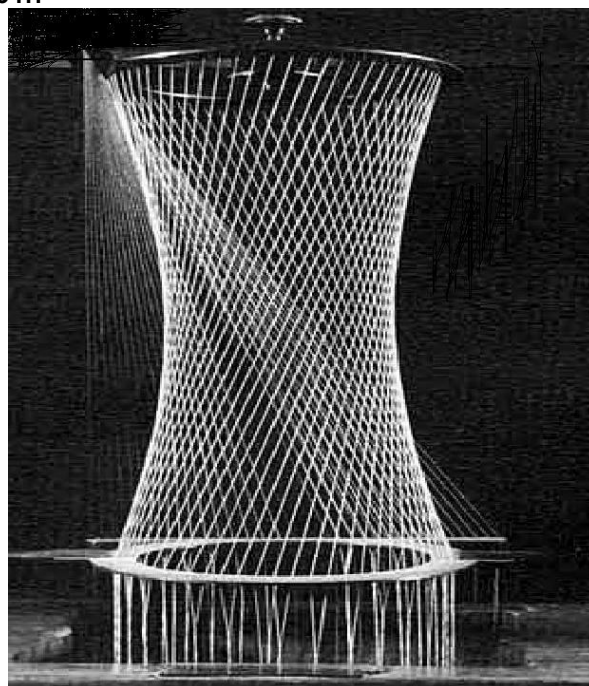


Рисунок 32. Диагональная схема установки тросов в тросовой градирне

4. Выводы

Покрытия из тросовых сеток как элемент архитектуры обладают очень широкими возможностями формообразования, которые ограничены лишь несущей способностью нитей [25] и опорного контура, а также требованием наличия отрицательной кривизны в любой точке их поверхности (рис. 20 и 21), кроме покрытий в форме перевернутого купола (рис. 19) [26]. Независимо от применения различных подходов к проектированию висячих тросовых конструкций задача ставится одна: обеспечить наличие в тросовых сетях только растягивающих усилий. Вначале необходимо решить какого вида тросовую конструкцию желательно применить, затем идет выбор геометрической формы сооружения [27] и, наконец, необходимо выбрать расчетную схему и приступить к прочностному расчету, который даст возможность уточнить предыдущие инженерные решения и подобрать детали крепления тросов между собой и к контурным структурам.

Литература

- [1]. Еремеев П. Г. Металлические конструкции покрытий уникальных большепролетных сооружений// Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 3.
- [2]. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Выдающиеся пространственные сооружения последних 20 лет// Монтажные и специальные работы в строительстве. 2012. № 12. С. 8-14.
- [3]. Кривошапко С.Н. О возможностях оболочечных сооружений в современной архитектуре и строительстве// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2013. № 1. С. 51-56.
- [4]. Bradshaw R., Campbell D., Gargari M., Mimiran A., and Tripeny P. Special structures. Past, present, and future// Journal of Structural Engineering. June 2002. P. 691-701.
- [5]. Ungureanu N., Căciulă Stan-Grăgoș, and Vrabie M. About some suspension roofs made of the orthogonal cable networks// Bul. Inst. Polit. Iași, t LVI (LX), f. 4. 2010. P. 111-119.
- [6]. Santoso Ketherina. Wide-Span Cable Structures. – University of California, Berkeley, 2004 (Degree of Masters of Engineering in Civil and Environmental Engineering). 70 p.
- [7]. Kloiber L.A., Eckmann D.E., Meyer Th.R., Hutzinger St.J. Design consideration in cable-stayed roof structures// North American Steel Construction Conference "Modern Steel Construction", March 2004. 7 p.
- [8]. Морозов А.П., Василенко О.В., Миронков Б.А. Пространственные конструкции общественных зданий. Л.: Стройиздат, 1977. 168 с.
- [9]. Кирсанов Н.М. Висячие и вантовые конструкции. М.: «Стройиздат», 1981. 156 с.
- [10]. Кривошапко С.Н. Тентовая архитектура// Строительство и реконструкция. 2015. № 3 (59). С. 100-109.
- [11]. Липницкий М.Е., Ленский В.В. Шатровые, вантовые и мембранные покрытия на круглом и квадратном плане применительно к покрытиям над автобусными гаражами, крытыми рынками и другими подобными сооружениями// Опыт проектирования и строительства зданий и сооружений с применением пространственных конструкций. М.: ЛенЗНИИЭП, 1980. С. 113-116.
- [12]. Елисеев Ю.А., Курбатов О.А., Морозов А.П., Дисман И.З. Конструктивное решение и монтаж висячего покрытия зала спортивно-концертного комплекса им. В.И. Ленина в Ленинграде// Опыт проектирования и строительства зданий и сооружений с применением пространственных конструкций. М.: ЛенЗНИИЭП, 1980. С. 120-124.
- [13]. Синицын А.П. Динамика гибких покрытий с большими прогибами// Висячие покрытия: Тр. совещания по исследованию и внедрению висячих покрытий. М.: ГСИ, 1962. 248 с.
- [14]. Качурин В.К. Теория висячих систем. Статический расчет. Л.: Госстройиздат, 1962. 224 с.
- [15]. Косенко И.С. Висячие конструкции покрытий (зарубежный опыт). М.: «Стройиздат», 1966. 88 с.
- [16]. Мацевейко В.Н., Шимановский В.Н. О напряженно-деформированном состоянии висячих покрытий шатрового типа// Строительная механика и расчет сооружений. 1972. № 4. С. 3-7.
- [17]. Кудинин В.И. Исследование предварительно напряженного покрытия из алюминиевых лент// Строительная механика и расчет сооружений. 1972. № 6. С. 10-14.
- [18]. Jayaraman H.B., Knudson W.C. A curved element for the analysis of cable structures// Comput. & Struct. 1981. Vol. 14, No 3/4. P. 325-333.
- [19]. Покровский Л.Н. Определение частот колебаний прямоугольной в плане пологой вантовой сетки// Известия вузов. Строительство и архитектура. 1972. № 7. С. 43-46.
- [20]. Машаров В.В. Рекомендации по назначению параметров и величины предварительного напряжения висячих тросовых покрытий двухъярусными системами и седловидными сетками с замкнутым опорным контуром. М.: МИСИ, 1982. 17 с.
- [21]. Анпилатова В.А., Головаш О.С. Формообразование вантовых сетей на поверхности, заданных опорным контуром// Прикладная геометрия и инженерная графика. Киев, 1981. Вып. 31. С. 41-44.

- [22]. Ружанский И.Л. Анализ современных тенденций развития конструктивных форм большепролетных покрытий висячего типа// Исследование и разработки по висячим и вантовым металлическим конструкциям. М.: ЦНИИПСК, 1980. С. 62-73.
- [23]. Штолько В.Г., Авдеев Г.А., Беднарский Б.А. Опыт проектирования и строительства железобетонных висячих оболочек для покрытия общественных зданий// Опыт проектирования и строительства зданий и сооружений с применением пространственных конструкций. М.: ЛенЗНИИЭП, 1980. С. 71-76.
- [24]. Штолько В.Г., Авдеев Г.А., Зелинский А.П. Висячие покрытия, возводимые методом пневматического набрызга бетона// Опыт проектирования и строительства зданий и сооружений с применением пространственных конструкций. М.: ЛенЗНИИЭП, 1980. С. 63-66.
- [25]. Сушенцев Б.М. Стальные канаты для предварительно-напряженных металлических и висячих конструкций (состояние и пути совершенствования)// Состояние и перспективы применения в строительстве пространственных конструкций: Тез. докл. 18-20 сентября 1980. Свердловск, 1980. С. 54-57.
- [26]. Rehan A.K. Cable suspended roof construction// Indian Concrete J. 1980. Vol. 54, N 4. P. 96-101.
- [27]. Meek John L., Xia Xiaoyan. Computer shape finding of form structures// Int. Journal of Space Structures. 1999. Vol. 14, No 1. P. 35-54.

Suspention cable structures and roofs of erections

S.N. Krivoshapko¹

*Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198,
Russia.*

ARTICLE INFO

scientific article

doi:

Article history

Received 26.05.2015

Keywords

cable-laid rope;
cable structures;
one-layered cable covering;
two-layered cable covering;
suspension reinforced concrete shell;
tensile combined structure;
connection of intersecting cables;
surface of negative gauss curvature;

ABSTRACT

Suspension structures are simple in assembling, safe in maintenance, and sometimes possess the architectural expressiveness. The well-known structures and buildings 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. Several large crashes of large-span cable roofs did not damp the interest to them from the part of architects and designers of public and industrial buildings.

¹ +7 (916) 555 0221, sn_krivoshapko@mail.ru (Sergey Nikolayevich Krivoshapko ,)

References

- [1]. Yeremeyev P. G. *Metallicheskiye konstruksii pokrytiy unikalnykh bolsheproletnykh sooruzheniy* [Metal structures of coverings of unic large span structures] Industrial and civil engineering. 2007. № 3.
- [2]. Krivoshapko S.N., Mamiyeva I.A. *Vydayushchiyesya prostranstvennyye sooruzheniya poslednikh 20 let* [Out-standing tridimensional constructions for the last 20 years] Erection procedures and special works in eginieering. 2012. № 12. S. 8-14.
- [3]. Krivoshapko S.N. *O vozmozhnostyakh obolocheynykh sooruzheniy v sovremennoy arkhitekture i stroitelstve* [About capacity of shell structures in modern architecture] Structural mechanics of engineering constructions and buildings. 2013. № 1. S. 51-56.
- [4]. Bradshaw R., Campbell D., Gargari M., Mimiran A., and Tripeny P. Special structures. Past, present, and future// Journal of Structural Engineering. June 2002. P. 691-701.
- [5]. Ungureanu N., Căciulă Stan-Grașoș, and Vrabie M. About some suspension roofs made of the or-thogonal cable networks// Bul. Inst. Polit. Iași, t LVI (LX), f. 4. 2010. P. 111-119.
- [6]. Santoso Ketherina. Wide-Span Cable Structures. – University of California, Berkeley, 2004 (Degree of Masters of Engineering in Civil and Environmental Engineering). 70 p.
- [7]. Kloiber L.A., Eckmann D.E., Meyer Th.R., Hautzinger St.J. Design consideration in cable-stayed roof structures// North American Steel Construction Conference "Modern Steel Construction", March 2004. 7 p.
- [8]. Morozov A.P., Vasilenko O.V., Mironkov B.A. *Prostranstvennyye konstruksii obshchestvennykh zdaniy* [Tridimensional structures of public buildings]. L.: Stroyizdat, 1977. 168 s.
- [9]. Kirsanov N.M. *Visyachiye i vantovyye konstruksii* [Hanging and cable-stayed structures]. M.: «Stroyizdat», 1981. 156 s.
- [10]. Krivoshapko S.N. *Tentovaya arkhitektura* [Tent architecture]. Building and reconstruction. 2015. № 3 (59). S. 100-109.
- [11]. Lipnitskiy M.Ye., Lenskiy V.V. *Shatrovyye, vantovyye i membrannyye pokrytiya na kruglom i kvadratnom plane primenitelno k pokrytiyam nad avtobusnymi garazhami, krytymi rynkami i drugimi podobnymi sooruzheniyami* [Marquee, cable-stayed and membrane coverings on round and square outline applied to coverings over garages, indoor markets and other constructs]. Experience of design and building of structures with applying of tri-dementional structures. M.: LenZNIIEP, 1980. S. 113-116.
- [12]. Yeliseyev Yu.A., Kurbatov O.A., Morozov A.P., Disman I.Z. *Konstruktivnoye resheniye i montazh visyachego pokrytiya zala sportivno-kontsertnogo kompleksa im. V.I. Lenina v Leningrade* [Constructive decision and erection of suspended roof of the hall of sport and concert Lenin complex in Leningrad]// Experience of design and building of structures with applying of tridementional structures. M.: LenZNIIEP, 1980. S. 120-124.
- [13]. Sinitsyn A.P. *Dinamika gibkikh pokrytiy s bolshimi progibami* [Dynamics of flexible coverings with big deflections]// Suspended roofs: Research and development of suspended coverings. M.: GSI, 1962. 248 s.
- [14]. Kachurin V.K. *Teoriya visyachikh system* [Suspended systems theory]. Static calculation. L.: Gosstroyizdat, 1962. 224 s.
- [15]. Kosenko I.S. *Visyachiye konstruksii pokrytiy (zarubezhnyy opyt)* [Suspended structures of roofs (foreign experience)]. M.: «Stroyizdat», 1966. 88 s.
- [16]. Matsveyko V.N., Shimanovskiy V.N. *O napryazhenno-deformirovannom sostoyanii visyachiy pokrytiy shatrovogo tipa* [About stress strain behaviour of suspended tent-shaped roofs] Structural mechanics and analysis of structures. 1972. № 4. S. 3-7.
- [17]. Kudinin V.I. *Issledovaniye predvaritelno napryazhennogo pokrytiya iz alyuminiyevykh lent* [Analysis of pre-stressed roof made of aluminium stripes] Structural mechanics and analysis of structures. 1972. № 6. S. 10-14.
- [18]. Jayaraman H.B., Knudson W.C. A curved element for the analysis of cable structures// Comput. & Struct. 1981. Vol. 14, No ¾. P. 325-333.
- [19]. Pokrovskiy L.N. *Opredeleniye chastot kolebaniy pryamougolnoy v plane pologoy vantovoy setki* [Determination of oscillation freaquency of rectangular cable-stayed grid] University news: Building and architecture. 1972. № 7. S. 43-46.

- [20]. Masharov V.V. *Rekomendatsii po naznacheniyu parametrov i velichiny predvaritelnogo napryazheniya visyachikh trosovykh pokrytiy dvukhpoyasnymi sistemami i sedlovidnymi setkami s zamknutym opornym konturom* [Recommendations about nomination of dimentions and value af pre-stress for suspended roofs two-lines systems and saddle-shaped grids]. M.: MISI, 1982. 17 s.
- [21]. Anpilatova V.A., Golovash O.S. *Formoobrazovaniye vantovykh setey na poverkhnosti, zadannykh opornym konturom* [Morphogenesis of cable-stayed grids on the surface, made by bearing outline]. Applied geometry and EGINEERING graphics. Kiyev, 1981. Vyp. 31. S. 41-44.
- [22]. Ruzhanskiy I.L. *Analiz sovremennykh tendentsiy razvitiya konstruktivnykh form bolsheproletnykh pokrytiy visyachego tipa* [Analysis of modern tendencies of structure form development of span suspended roofs]. Research and elaboration of suspended and cable-stayed structures M.: TsNIIPSK, 1980. S. 62-73.
- [23]. Shtolko V.G., Avdeyev G.A., Bednarskiy B.A. *Opyt proyektirovaniya i stroitelstva zhelezobetonnykh visyachikh obolochek dlya pokrytiya obshchestvennykh zdaniy* [Constructing and building of reinforced concrete suspended shells for public buildings covering experience]. Experience of constructing and building with applying of tridimensional structures. M.: LenZNIIEP, 1980. S. 71-76.
- [24]. Shtolko V.G., Avdeyev G.A., Zelinskiy A.P. *Visyachiye pokrytiya, vozvodimyye metodom pnevmaticheskogo nabryzga betona* [Suspended roofs erected by pneumatical shotcreting]. Experience of constructing and building with applying of tridimensional structures. M.: LenZNIIEP, 1980. S. 63-66.
- [25]. Sushentsev B.M. *Stalnyye kanaty dlya predvaritelno-napryazhennykh metallicheskiy i visyachikh konstruksiy (sostoyaniye i puti sovershenstvovaniya)* [Steel cables for pre-stressed metal and suspended structures (condition on the way to perfection)] Condition and perspective of tridimensional structures in applying in building: Tez. dokl. 18-20 sentyabrya 1980. Sverdlovsk, 1980. S. 54-57.
- [26]. Rehan A.K. Cable suspended roof construction// Indian Concrete J. 1980. Vol. 54, N 4. P. 96-101.
- [27]. Meek John L., Xia Xiaoyan. Computer shape finding of form structures// Int. Journal of Space Structures. 1999. Vol. 14, No 1. P. 35-54.

Кривошапко С.Н. Висячие тросовые конструкции и покрытия сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №7(34). С. 51-70.

Krivoshapko S.N. Suspension cable structures and roofs of erections. Construction of Unique Buildings and Structures, 2015, 7(34), Pp. 51-70. (rus)