

Е.Ю. Агеева, А.И. Спиридонова

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАНТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЗРЕЛИЩНЫХ ЗДАНИЯХ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет"

Е.Ю. Агеева, А.И. Спиридонова

ВАНТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ В ЗРЕЛИЩНЫХ ЗДАНИЯХ

Утверждено редакционно-издательским советом университета в качестве
учебного пособия

Нижний Новгород
ННГАСУ
2015

ББК 87.66
А 23
Ф 53
УДК 130.2

Рецензенты:

В.Ю. Шиман - заслуженный строитель России, член Союза архитекторов России
Н.Я. Даняев - директор ОАО «ВОЛГОВЯТАГРОПРОЕКТ», лицензированный архитектор

Агеева Е.Ю. Особенности применения вантовых конструкций в зрелищных зданиях [Текст]: учебн. пос. для вузов / Е.Ю. Агеева, А.И. Спиридонова; Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т – Н. Новгород: ННГАСУ, . 2015- 79 с . ISBN

В пособии систематизирован материал по истории создания и развития вантовых конструкций в зрелищных зданиях на протяжении XIX–XXI веков, выявлены достоинства и недостатки применения вантовых конструкций; проанализированы архитектурные и конструктивные особенности зрелищных зданий с вантовыми конструкциями; рассмотрены наиболее выдающиеся зрелищные сооружения, являющиеся памятниками архитектуры.

Рекомендуется преподавателям, аспирантам, магистрантам и студентам специальностей: «Архитектура», «Промышленное и гражданское строительство», «Строительство уникальных зданий и сооружений».

© Агеева Е.Ю., 2015
© Спиридонова А.И., 2015
© ННГАСУ, 2015

Введение

Архитектура ближайшего будущего, без сомнения, должна нацелиться на то, чтобы, используя последние достижения инженерной мысли, осуществить переход на новый этап своего развития – создать и максимально расширить более комфортное и безопасное пространство для обитания человека. Большие, открытые и защищённые от внешней среды пространства, в которых много естественного света и комфорта – вот к чему должны быть направлены устремления современной архитектуры.

При проектировании и строительстве зданий с зальными помещениями возникает комплекс сложных архитектурных и инженерных задач. Для создания комфортных условий в зале, обеспечения требований технологии, акустики, изоляции его от других помещений и окружающей среды определяющее значение приобретает конструкция покрытия зала.

Вантовые конструкции получили широкое распространение в строительстве. Они оказывают большое влияние на формирование архитектуры большепролетных сооружений, их применяют и в зданиях со сложными объемно-пространственными решениями, их пластические качества обогащают художественную палитру архитектора. Инженерно-технические возможности вантовых конструкций, открывают большие перспективы в решении сложных функционально-технологических и технических вопросов, возникающих при проектировании крупных общественных и промышленных зданий.

Распространение висячих систем объясняется, прежде всего, экономической эффективностью, низкой материалоемкостью и принципиально новыми возможностями, открывающимися для решения сложных архитектурно-планировочных и конструктивно-технических задач.

Возможность перекрытия больших пространств без промежуточных опор снимает конструктивные ограничения на организацию гибкой планировки здания, позволяет приспособлять его под различные меняющиеся во времени функционально-технологические процессы,

распоряжаться перекрытым пространством в соответствии с потребностями производства, быта и общественной жизни, делая конструкцию и сооружение универсальными во времени.

Современные достижения в области теории расчета сооружений, опыт возведения и эксплуатации висячих покрытий в России и за рубежом подтверждают высокую надежность и экономическую эффективность этих конструкций.

Данная работа системно освещает вопросы, посвященные истории развития, классификации, формообразованию зрелищных зданий с вантовыми конструкциями. Серьезное и тщательное изучение вантовых систем в строительстве зданий и сооружений, безусловно, необходимо и связано со стремлением современного строительства к сочетанию экономичности и архитектурной выразительности при проектировании и возведении зданий и сооружений с большими пролетами.

Глава 1. История развития вантовых конструкций в зрелищных зданиях и сооружениях

1.1. Общие сведения о вантовых конструкциях

Вантовые конструкции – это конструкции, состоящие из несущих пролетных элементов в виде стальных вант и воспринимающих их реакции опорных частей (опорный контур). В некоторых конструктивных формах включаются также элементы, передающие распор (оттяжки и распорки).

Ванты – несущие элементы стержневого типа (тросы, канаты, гибкие стержни, пучки высокопрочной проволоки, ленты и т.п.), работающие в основном на растяжение.

Опорный контур – конструктивный элемент, на котором непосредственно закреплены пролетные конструкции; может быть жестким, т.е. способным работать на сжатие, изгиб или кручение, и гибким, выполненным в виде элемента с пренебрежимо малой жесткостью.

Вантовые конструкции получили широкое распространение при строительстве зданий с большими пролетами: спортивных залов, стадионов, выставочных залов, кинотеатров, торговых залов, цирков, рынков, аэродромов, гаражей, производственных цехов и т. д.

Вантовые конструкции выгодно отличаются от традиционных стальных конструкций, имея ряд основных достоинств:

- В растянутых несущих пролетных элементах эффективно используется вся площадь сечения вант и применяются высокопрочные стали, что обеспечивает малую массу несущей конструкции.
- При монтаже вантового покрытия, как правило, не требуются леса и подмости, что упрощает возведение покрытия и снижает трудоемкость.
- Ванты, свернутые в бухты, обеспечивают хорошую транспортабельность покрытия.
- Вантовые конструкции позволяют перекрывать большие пролеты без промежуточных опор.

- С увеличением перекрываемого пролета экономичность покрытия здания возрастает, поскольку масса несущей пролетной конструкции остается относительно малой.
- Своеобразные конструктивные формы покрытия и опорных конструкций позволяют повышать эстетическую выразительность сооружения.
- Покрытия зданий, образованных отдельными видами вантовых конструкций, благодаря своей форме создают в нем наиболее благоприятные условия акустики, видимости, освещенности.
- Надежность в эксплуатации.

К недостаткам вантовых конструкций относятся:

- повышенная деформативность покрытия. Повышенная деформативность покрытий зданий, образованных вантовыми конструкциями, вызвана способностью вант изменять свою начальную геометрическую форму в зависимости от внешней нагрузки. Для обеспечения жесткости покрытия вантовой конструкции приходится применять дополнительные конструктивные мероприятия. Деформативность покрытия – главный недостаток вантовых конструкций, который нужно рассматривать как их особенность;
 - необходимость устройства в ряде случаев опорных элементов, требующих большого расхода материала, приводит к удорожанию вантовых конструкций в целом;
 - повышенная деформативность покрытий вантовых конструкций затрудняет их применение для производственных зданий с крановым оборудованием;
 - относительная трудность водоотвода.

Для снижения деформативности покрытий вантовых конструкций, производят их стабилизацию.

Существуют следующие способы стабилизации покрытия:

- стабилизация пригрузкой. Стабилизация пригрузкой может осуществляться грузами жестко с собой не связанными (например, сборными железобетонными плитами) или с помощью жесткой конструкции (например, монолитной железобетонной оболочкой; но при этом необходимо до замоноличивания оболочки осуществить предварительную пригрузку покрытия для предотвращения появления растягивающих усилий в оболочке в стадии эксплуатации);
- создание двухпоясных систем. При этом способе наряду с несущим тросом используется стабилизирующий (натяжной) трос, который связан с несущей системой жестких распорок, гибких подвесок или одновременно распорок и подвесок, или гибких раскосов. Напрягающий трос может располагаться ниже или выше несущего;
- применение перекрестных систем. При этом способе стабилизации отрицательная нагрузка воспринимается стабилизирующими тросами, располагаемыми поперек несущих. При этом несущие и стабилизирующие тросы образуют седловидную поверхность отрицательной гауссовой кривизны;
- применение наряду с гибкими вантами жестких элементов. Жесткие элементы служат для стабилизации формы покрытия и распределения сосредоточенных и неравномерных нагрузок на несколько несущих вант;
- применение висячих ферм и балок, представляющих собой *жесткие ванта*. Они служат для стабилизации покрытий с легкой кровлей.

Необходимо отметить, что преимущества вантовых конструкций доминируют над недостатками, что является предпосылкой к их широкому применению.

Вантовые конструкции можно классифицировать по разным признакам. Но поскольку на формирование объемно-пространственной

структуры зданий, образованных вантовыми конструкциями, совместно влияют конструктивная форма покрытия и форма опорного контура, то целесообразно выполнять классификацию именно по особенностям этих конструктивных элементов.

В вантовых конструкциях применяются следующие виды покрытий:

- однопоясные вантовые покрытия с параллельными вантами (рис. 1.1);

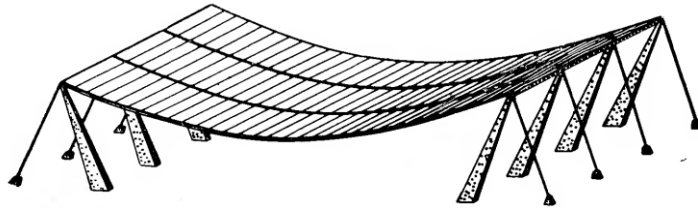


Рис. 1.1. Пример вантовых конструкций с однопоясным вантовым покрытием с параллельными вантами

- однопоясные вантовые покрытия с радиальными вантами (рис.1.2);

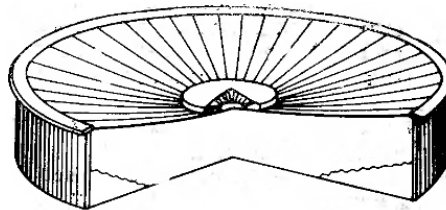


Рис. 1.2. Пример вантовых конструкций с однопоясным вантовым покрытием с радиальными вантами

- двухпоясные вантовые покрытия с параллельными вантами (рис.1.3);

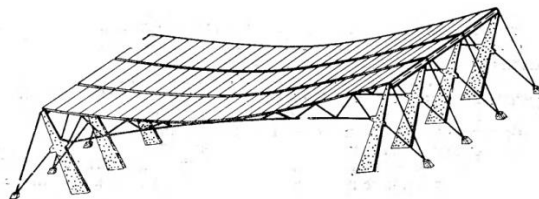


Рис. 1.3. Пример вантовых конструкций с двухпоясным вантовым покрытием с параллельными вантами

- двухпоясные вантовые покрытия с радиальными вантами (рис.1.4);

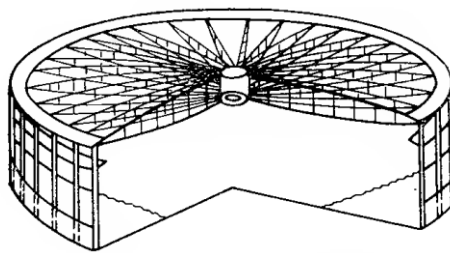


Рис. 1.4. Пример вантовых конструкций с двухпоясным вантовым покрытием с радиальными вантами

- покрытия с вантовыми сетями (рис.1.5);

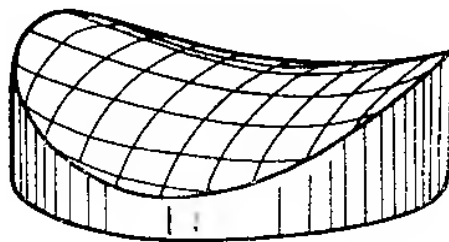


Рис. 1.5. Пример вантовых конструкций с вантовыми сетями

- струнные покрытия (рис.1.6);

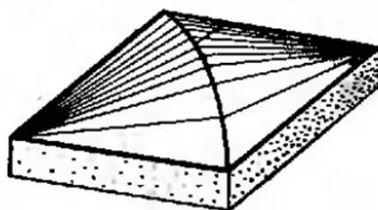


Рис. 1.6. Пример вантовых конструкций со струнным покрытием

- покрытия с висячими фермами и балками (жесткими вантами) (рис.1.7);

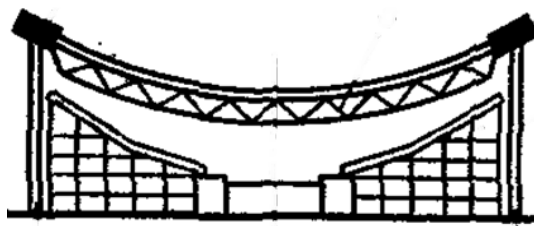


Рис. 1.7. Разрез здания, образованного вантовыми конструкциями с жесткими вантами

- комбинированные системы покрытий (сочетание гибких вант и жестких элементов) (рис.1.8);

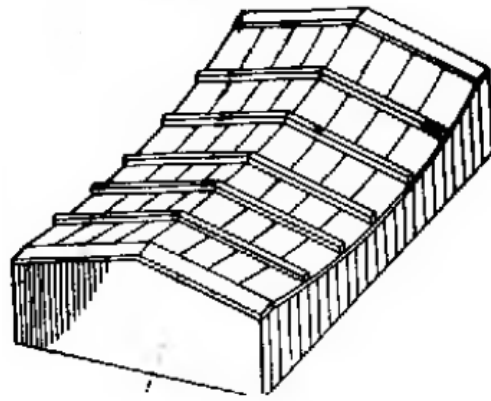


Рис. 1.8. Пример вантовых конструкций с комбинированным покрытием - подвесные покрытия (рис.1.9)

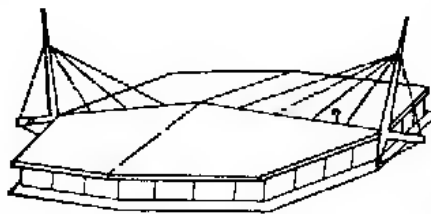


Рис. 1.9. Пример вантовых конструкций с подвесным покрытием

Геометрия и конструктивная форма опорного контура должны быть увязаны с принятой системой несущих конструкций и с формой здания в плане.

Жесткие опорные контуры вантовых конструкций по форме могут быть плоские и пространственные с прямолинейным и криволинейным, замкнутым и незамкнутым, симметричным и несимметричным очертанием.

Висячие пролетные элементы вантовых конструкций в случае замкнутого опорного контура крепят к жестким опорным конструкциям, которые могут быть выполнены в виде опорного замкнутого контура (кольцо, овал, прямоугольник и др.), передающего усилия через колонны или через контурные наклонные рамы или арки на фундаменты. Горизонтальные реакции пролетной конструкции погашаются внутри опорного контура. На нижележащую часть сооружения передаются только вертикальные нагрузки. Если опорный контур не замкнут, то горизонтальные усилия передаются через подкосы, контрфорсы, оттяжки с анкерами и т. д. на фундаменты. Эти элементы испытывают значительные усилия от распора вант и требуют

соответственно большего расхода материалов. Системы с замкнутым опорным контуром поэтому являются более экономичными.

Гибкий опорный контур представляет собой *трос-подбор*.

1.2. Этапы развития зданий с вантовыми конструкциями

В 1834г. был изобретен проволочный трос. Это означало появление конструктивного элемента, незаменимого во многих отраслях современной техники, что определяется его замечательными свойствами – высокой прочностью при малом весе, гибкостью, долговечностью. В строительстве проволочные тросы были впервые применены в качестве несущих элементов висячих мостов, а затем и в большепролетных висячих покрытиях. Пробразы таких покрытий – палатки или шатры; их мягкая оболочка (мембрана) является одновременно и ограждающей, и несущей конструкцией покрытия. В вантовых (тросовых) покрытиях эти функции разделены. Несущими элементами являются тросы, а ограждением – конструкция заполнения (кровли).

1.2.1. Первые здания с вантовыми конструкциями В.Г. Шухова

Висячие системы, а к ним относятся системы, образованные вантовыми конструкциями, для покрытий зданий впервые были предложены выдающимся русским инженером и ученым В. Г. Шуховым (1853-1939 гг).

12 марта 1899 г. Шухову была выдана привилегия (авторское свидетельство, патент) №1894, заявленная 27.03.1895г. на «*Сетчатые покрытия для зданий*» рис. 1.10, 1.11.

Выдача этого патента В.Г.Шухову ознаменовала собой новый этап в развитии металлических строительных конструкций.

О П И С А Н И Е

сѣтчатыхъ покрытій для зданій.

Къ привилегіи инженеръ-механика **В. Шухова**, въ Москвѣ, заявленной 27 Марта 1896 года.

Предлагаемое устройство сѣтчатыхъ покрытій для разнаго рода зданій состоитъ изъ сѣтчатой системы, изготовляемой изъ полосового и углового желѣза и подвѣшиваемой къ кольцеобразнымъ и прямолинейнымъ балкамъ, поддерживаемымъ стѣнами и колоннами, причемъ полосы и уголки, въ мѣстахъ изъ взаимнаго пересѣченія, склепаны между собою. Образуются этими полосами четырехугольники разныхъ формъ покрываемые кровельнымъ матеріаломъ, причемъ, въ случаѣ теплыхъ покрытій, обѣ стороны сѣтчатой поверхности, т. е. внутренняя и внѣшняя, одѣваются деревомъ съ прокладкой какихъ либо плохихъ проводниковъ тепла. На чертежѣ фиг. 1 и 2 изображаются устройство, въ которомъ между стѣнами и внутренними колоннами протянуты полосы 1, 1, 2, 2, образующія сѣтку, замѣняющую обыкновенныя стропила. Внутренняя часть, надъ колоннами, покрывается куполообразною поверхностью, состоящею изъ жесткихъ уголковъ 3, 3. Расположеніе этихъ уголковъ можетъ быть взаимно перпендикулярное, какъ показано на фиг. 2^a, причемъ линіи 5, 6, 7 и 8 идутъ по принятымъ пересѣченіямъ куполообразной поверхности вертикальными плоскостями. Получаемымъ такимъ путемъ сѣтчатая покрывка представляетъ собою значительную экономию въ вѣсѣ сравнительно съ обыкновенно устраиваемыми формами стропилъ. Элементы сѣтки подвержены всегда одному усилію, т. е. или растяженію или сжатію, будучи склепаны и связаны въ мѣстахъ пересѣченія, они образуютъ поверхность, способную сопротивляться большимъ

сосредоточеннымъ грузамъ. Кроме того, однородность формы желѣза по всей поверхности обуславливаетъ значительное упрощеніе въ изготовленіи и сборкѣ покрытій. Подвѣсьныя сѣтки, ошпировавшіяся, въ случаѣ круглыхъ зданій, на кольцевую балку, уложенную на стѣнахъ или колоннахъ, вызываютъ въ этой балкѣ усилія сжатія. Для противодействия этому усилію прихлѣняется конструкция круглой балки, показанная на фиг. 3; она состоитъ изъ желѣзной коробки *a b c d*, внутри которой помещена масса и (защитившаяся на чертежѣ) изъ кирпичной кладки или бетона, принимающая на себя усиліе сжатія. Кирпичная кладка или бетонъ закладываются черезъ отверстіе *a*, устраиваемое въ верхней части балки. Въ случаѣ подвѣсныхъ сѣтокъ, т. е. такихъ, элементы которыхъ подвержены усиліямъ растяженія, полосы располагаются такъ, что ихъ широкая сторона лежитъ въ горизонтальной плоскости, какъ это показано на фиг. 1, причемъ полосы склепываются между собою въ мѣстахъ пересѣченія. Если же сѣтки подвержены дѣйствію сжатія, то полосы устанавливаются такъ, что широкое ребро ихъ вертикально, какъ это показано при *f, g* и *i* на фиг. 5. Детальное устройство жесткой сѣтки изъ уголковъ показано при *k* и *k*, на фиг. 6.

Фиг. 4 изображаетъ устройство сѣтчатого покрытія изъ полосъ или уголковъ 11, 12 на прямоугольномъ зданіи, причемъ открывающія стѣны, вызываемое натяженіемъ покрытія предохраняется раскосами 11, 16 и тягами 14, 15.

Предметъ привилегіи.

(Ст. 20, п. 4 и ст. 22 Положенія о привилегіяхъ на изобр. и усоверш.)

Сѣтчатая покрывка для зданій, характеризующаяся тѣмъ, что ихъ остовъ состоитъ изъ сѣтки, образуемой пересѣкающимися и склепываемыми въ мѣстахъ пересѣченія же-

лѣзными полосами и угольниками, расположенными, какъ показано на фиг. 1, 2 и 2^a, причемъ при кругломъ периметрѣ зданія, стягивающее усиліе передается этой сѣткою жесткому кольцу *n* (фиг. 3), состоящему изъ желѣзной коробки, заполненной бетономъ или кирпичной кладкой, — при прямолинейномъ периметрѣ — металлическимъ подкосамъ 16 и тягамъ 15 (фиг. 4).

Рис. 1.10. Привилегія №1894 на висячие сетчатые покрытия

В. Г. Шухова

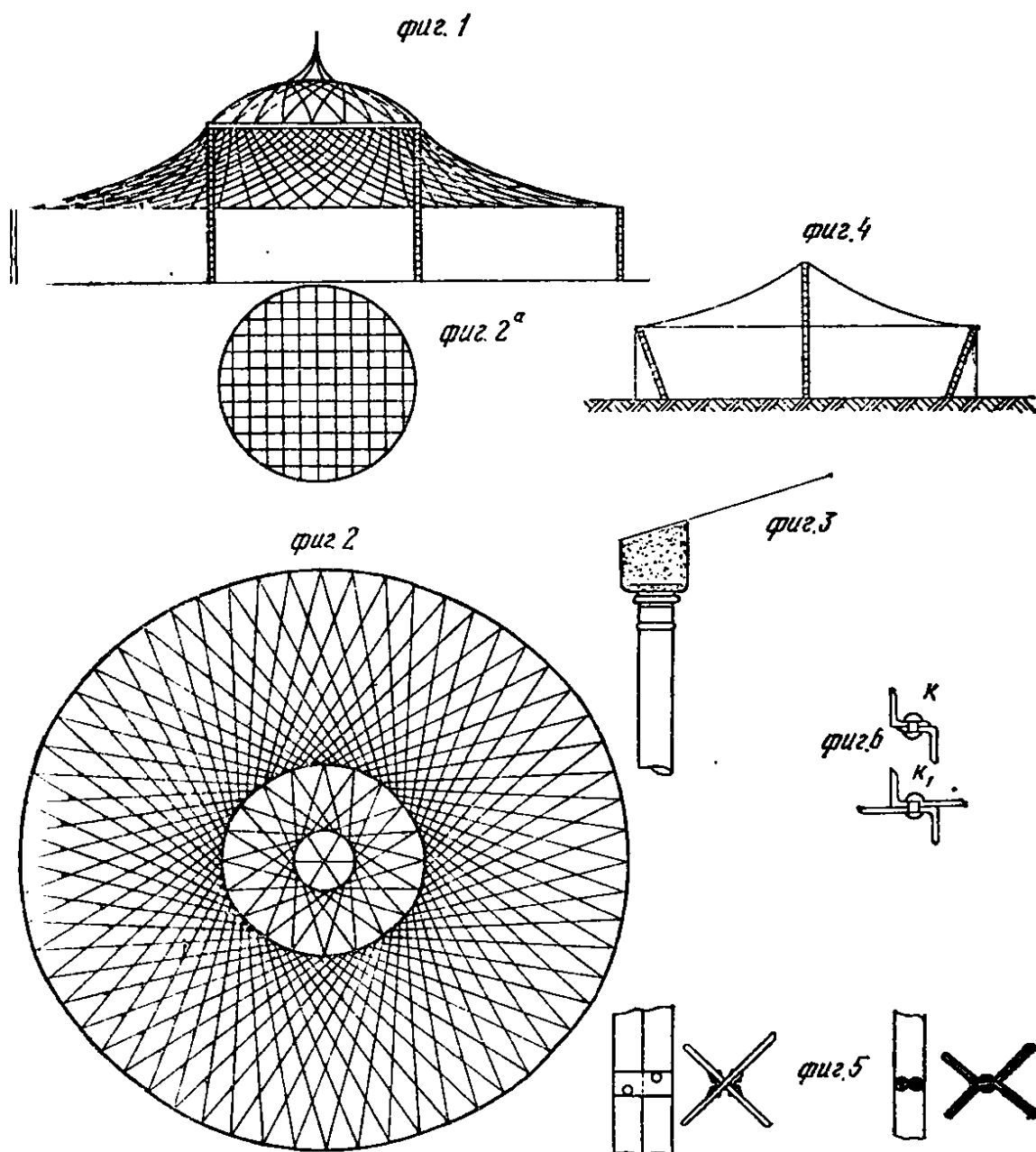


Рис. 1.11. Чертеж к привилегии №1894 на висячие сетчатые покрытия

В. Г. Шухова

Основной идеей предложения являлось изготовление вместо обычных покрытий, состоящих из отдельных состыкованных плоских ферм, пространственных несущих конструкций из однотипных (одинаковых) частей. Линейные диагонально пересекающиеся элементы, соединенные в местах перекрещивания на заклепках или болтах, образуют сетку с ромбовидными ячейками. Эта сетка может применяться как висячая, растянутая или как сводчатая конструкция со сжатыми элементами. В обоих

случаях поверхности могут быть образованы как с одинарной, так и с двойкой кривизной.

Касательно висячих систем в данном случае предлагаются две формы покрытия, одно из них – висячее покрытие над прямоугольным планом – показано на фиг. 4 (рис. 1.11). Его сетчатая поверхность с одинарной кривизной натянута между одной коньковой и продольными контурными балками. Контурные балки, работающие на изгиб, раскреплялись в основании при помощи наклонных стоек.

Висячее покрытие с двойкой (отрицательной) кривизной над круглым в плане зданием показано на фиг. 1 и 3 (рис. 1.11). Закручивающиеся в две стороны (направо и налево) элементы, работающие на растяжение, подвешены между наружным сжатым и внутренним растянутыми кольцами. Они образуют сетку с увеличивающимися к наружному краю ячейками.

Преимуществами сетчатых конструкций являются: заметное уменьшение веса по сравнению с обычными конструкциями покрытия; работа элементов только на одноосное напряжение (растяжение или сжатие); высокая несущая способность сетчатой поверхности и в случае сосредоточенных нагрузок; значительное упрощение изготовления и монтажа благодаря наличию одинаковых конструктивных элементов. Для висячих покрытий растянутые элементы представляют собой металлические полосы, широкая плоскость которых совпадает с поверхностью покрытия и которые под действием собственного веса провисают и принимают форму цепной линии.

Свое первое висячее покрытие Шухов возвел в 1894 г. в Москве над круглым в плане цехом (диаметром 44 м) *котельного завода Бари*. Этот редкий памятник строительных конструкций и архитектуры существовал еще в семидесятые годы XX века.

Быстрота, с которой последовали изготовление и патентование этих новых вантовых конструкций в последующие годы, вызывала большое удивление. И в 1896 г. в Нижнем Новгороде была организована *Все-*

российская художественная и промышленная выставка – показательный смотр достижений России в ремесленном производстве и промышленности. Впечатляющий ряд сооружений (рис. 1.12), полностью запроектированных В. Г. Шуховым, которые полностью были изготовлены фирмой Бари, состоял из четырех павильонов с висячими покрытиями, перекрывающими общую площадь порядка 10 160 м², а также из четырех павильонов с сетчатыми (выпуклыми) оболочками с общей перекрываемой площадью 16 910 м². Этот ряд завершался сетчатой конструкцией новейшего типа – водонапорной башней в виде гиперboloида.

Висячие покрытия были у трех зданий строительного и инженерного отдела: выставочного павильона с круглым планом и двух продольных зданий с прямоугольным планом, и, кроме того, у четвертого павильона с овальным планом – здания, завершающего заводско-ремесленный отдел.



Рис. 1.12. Общий вид павильонов Всероссийской художественной и промышленной выставки в Нижнем Новгороде, 1896 г.

Эти четыре павильона, как свидетельствуют различные отчеты, были наиболее выразительными среди выставочных павильонов. На это указывается и в путеводителе по выставке, который был издан на четырех языках. Остальные большие выставочные павильоны были, как сказано в

путеводителе, «обычного выставочного типа, так называемые промышленные павильоны последних международных выставок».

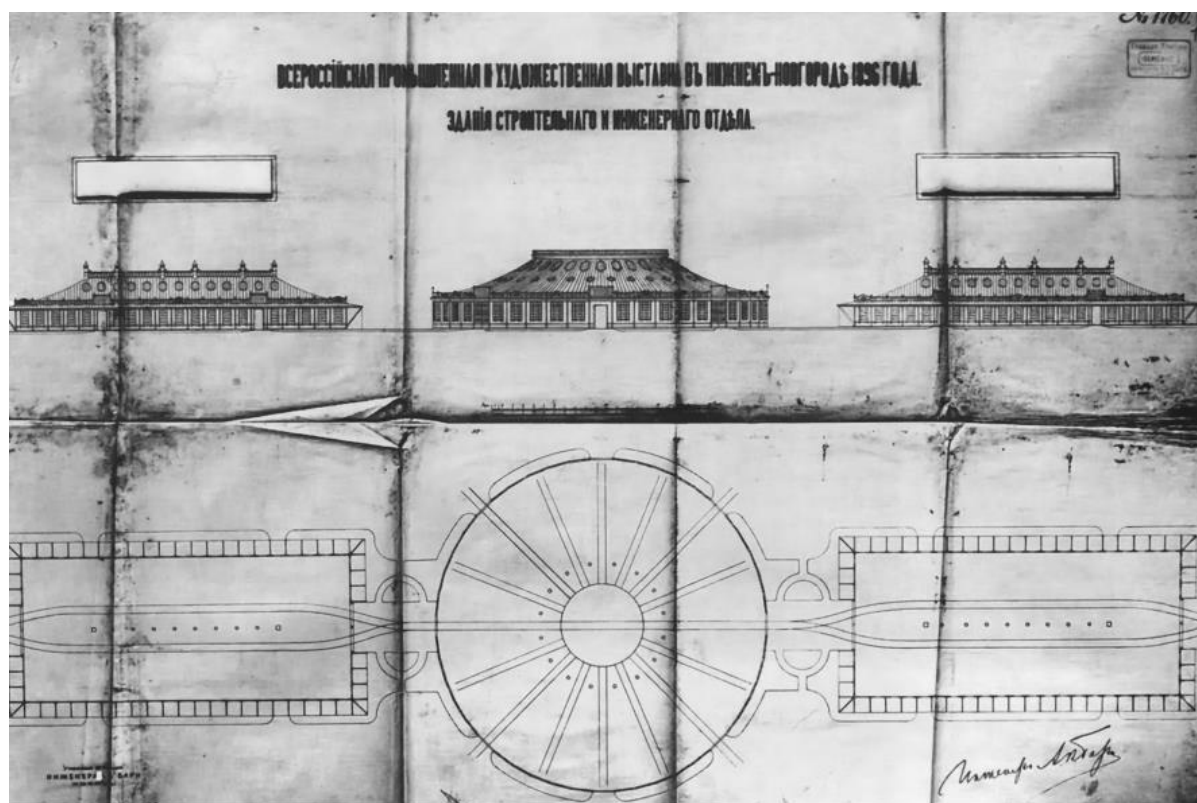


Рис. 1.13. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Ротонда и прямоугольные здания строительного и инженерного отдела с деревянными покрытиями. Чертеж с фасадами и планами (69,6 x 103 см)

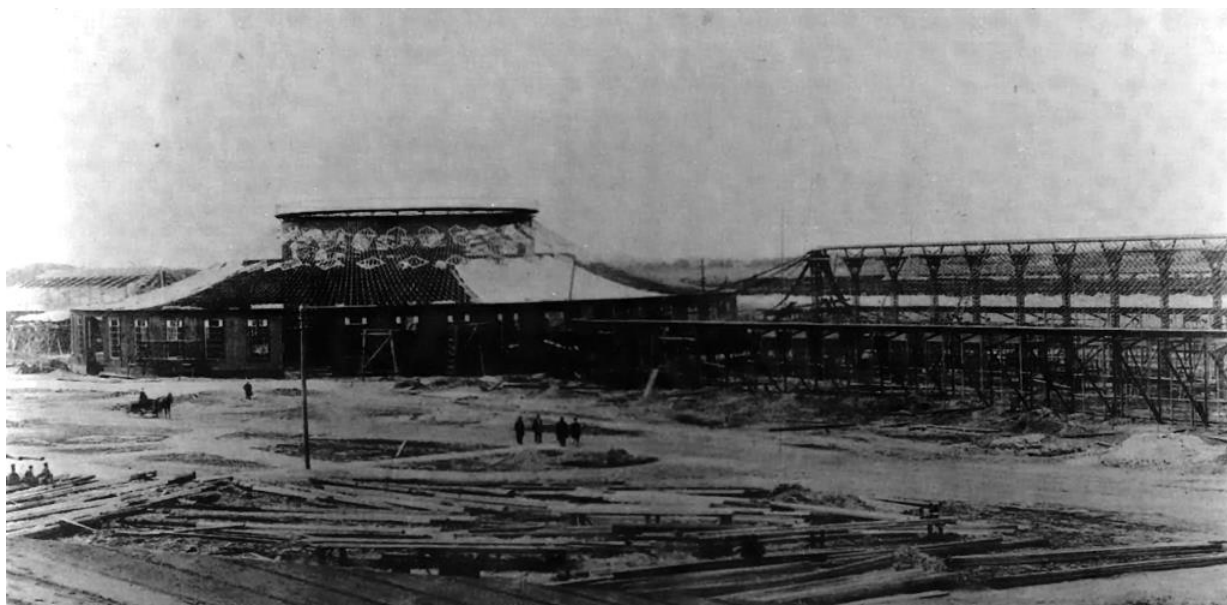


Рис. 1.14. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Ротонда и прямоугольный выставочный павильон в период строительства

Висячие покрытия В.Г. Шухова безусловно выгодно отличались от других сооружений. «Ротонда и прилегающие прямоугольные здания могут по праву рассматриваться как самостоятельные экспонаты. Они построены из металла инженером Бари по системе инженера-механика Шухова. Оригинальность этих конструкций состоит в том, что их покрытия образованы без прогонов сильно натянутой, висячей, образованной из листовой стали сети. Вследствие того покрытие в разрезе образует форму цепной линии».

Перекрытие круглого павильона (рис. 1.15.) (диаметр 68,3м, высота 15м) состояло из двух висячих покрытий. Между жестким кольцом, опиравшимся на 16 опор, и одним сжатым кольцом, лежащим на наружной стене, была натянута сеть из 640 клепаных стальных полос (50,8 х 4,76 мм, пролет сети 21,50 м). К внутреннему кольцу диаметром 25 м была подвешена мембрана из листа в форме плоского (пологого) колпака (стрела провиса 1,50 м). Напряжения растяжения во внутреннем кольце, возникающие от внешней висячей сети, частично компенсировались благодаря наличию внутренней висячей мембраны. Дождевая вода отводилась на нижнюю сторону при помощи двух труб (рис. 1.16).

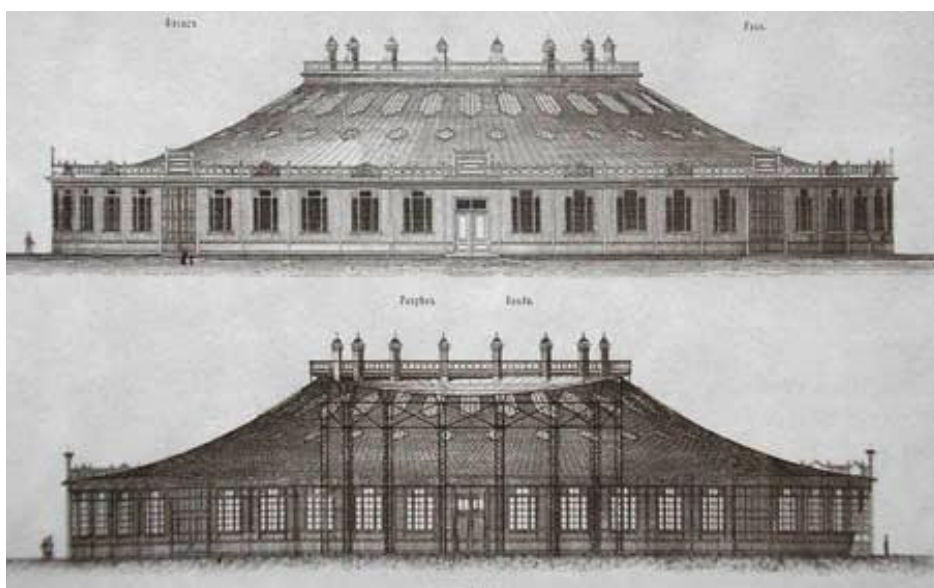


Рис 1.15. Инженерно-строительный павильон круглой формы Всероссийской художественной и промышленной выставки в Нижнем Новгороде с висячим покрытием, запроектированным В. Г. Шуховым (фасад, разрез)

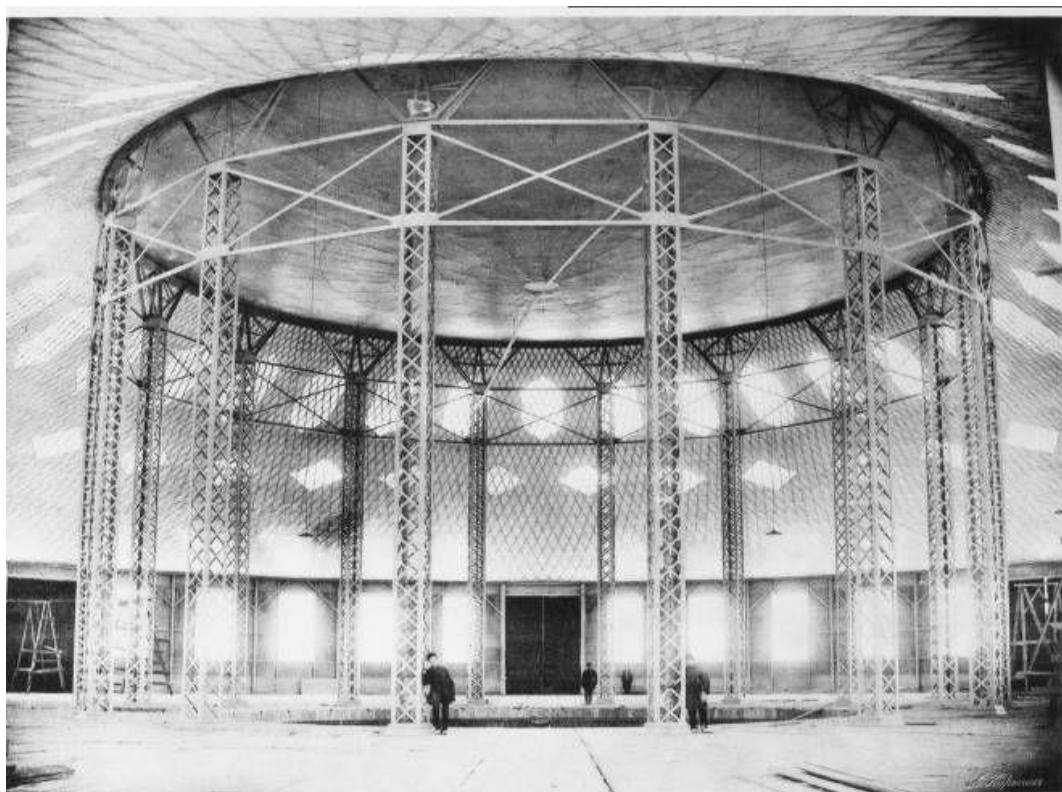


Рис 1.16. Инженерно-строительный павильон круглой формы Всероссийской художественной и промышленной выставки в Нижнем Новгороде с висячим покрытием, запроектированным В. Г. Шуховым

По сравнению с висячими сетчатыми покрытиями листовые покрытия имели практический недостаток, а именно, необходимость устройства вспомогательных деревянных лесов для выполнения клепки и монтажа, что было относительно дорого. В то же время преимуществом листовых покрытий являлось то, что их использование позволяло сделать последний шаг к унификации всех частей.

В центре ротонды находился вращающийся круг диаметром 18 м, от которого отходило 18 путей. Два пути вели в соседний прямоугольный павильон (длина 68 м, ширина 30 м и высота 11 м) с висячим покрытием (рис. 1.17). Это покрытие в виде сети с одинаковыми ячейками (из таких же стальных полос, как и при покрытии ротонды) образовывало четырехскатную крышу. Легкая решетчатая коньковая балка опиралась на девять опор. По ребрам, как и в местах пересечения продольных и торцевых скатов, устанавливались несущие элементы из более толстых полос (20 х 6 мм), которые натягивались от концов коньковых балок к углам.

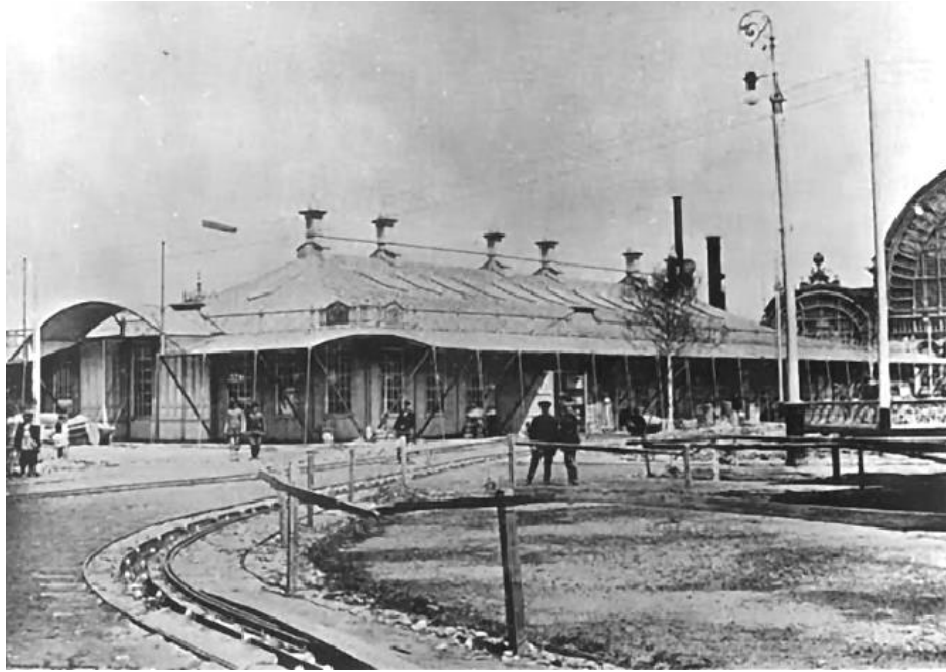


Рис. 1.17. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Прямоугольный выставочный павильон, внешний вид

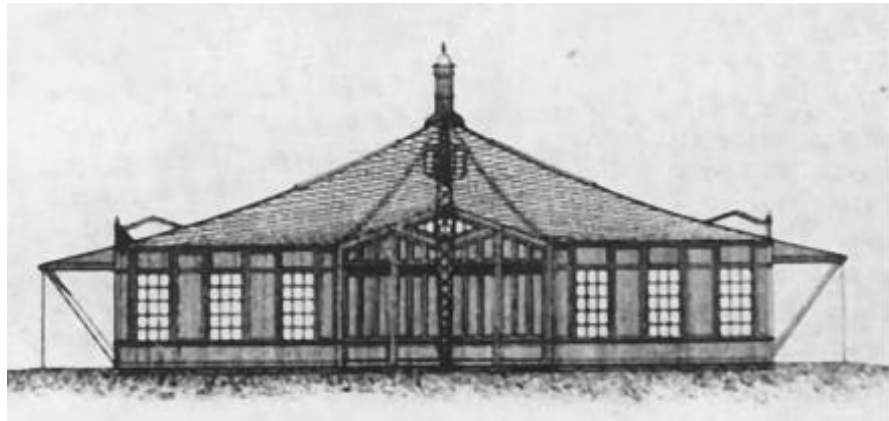


Рис. 1.18. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Прямоугольный выставочный павильон с висячим покрытием, поперечный разрез

Сеть торцевых сторон имела ячейки, вытянутые поперек (по-другому, чем у продольных сторон), и передавала главные усилия в поперечном направлении в нижнюю зону через пролет, больший, чем при других видах кровли. Для уменьшения провисания сети последняя была подкреплена в середине двумя другими, натянутыми от конькового бруса к контуру, стальными полосами (30 х 6 мм), которые одновременно служили оттяжками для стоек (рис. 1.18).



Рис. 1.19. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Прямоугольный выставочный павильон во время строительства

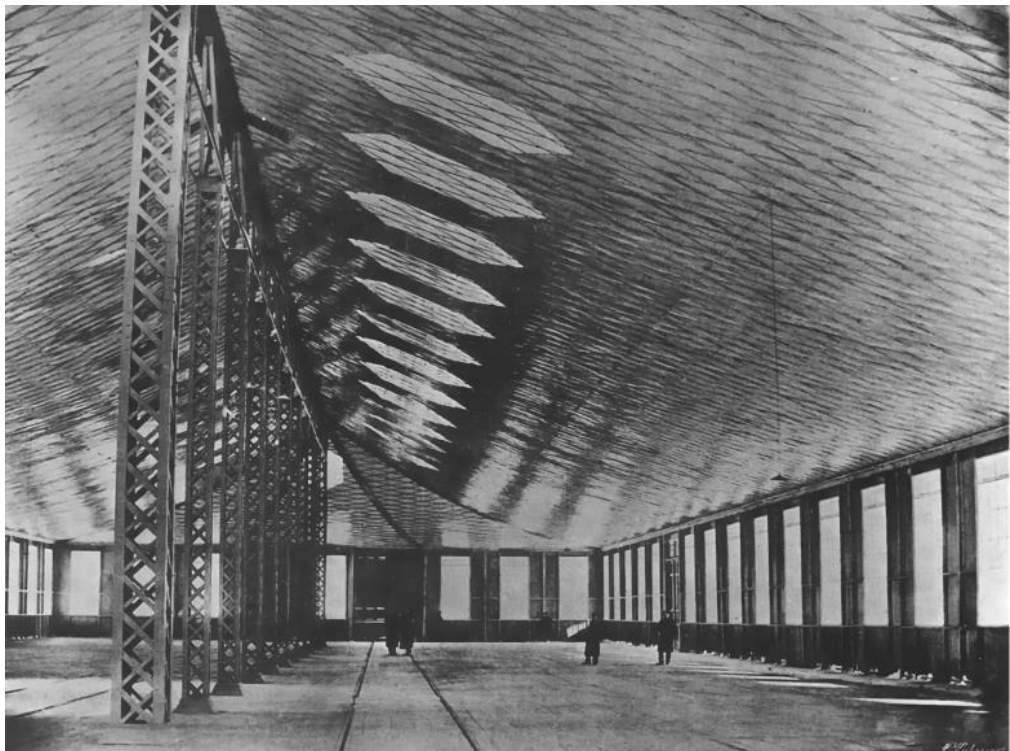


Рис. 1.20. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Прямоугольный выставочный павильон, интерьер

Прямые контурные элементы, работающие на изгиб, были раскреплены через анкеры в основание при помощи наклонных стоек трубчатого

поперечного сечения. Контурные элементы укладывались на вертикальных стенах, которые с некоторым шагом подпирались наклонными стойками. Таким образом, висячее сетчатое покрытие зримо простиралось только до наружного контура кровли, который представлял собой выдвинутый деревянный козырек (карниз). Растянутые металлические профили, которые связывали контурные балки со стойками, служили одновременно прогонами этого козырька (рис. 1.17, 1.18).

Все сетчатые покрытия накрыты, как обычно в России, оцинкованным железом, которое крепилось по ячейкам непосредственно к сетке (рис. 1.23). Такая кровля, прежде всего для покрытий прямоугольных павильонов, способствовала повышению устойчивости. В то время как устойчивость покрытия ротонды достигалась за счет двоякой кривизны её поверхности, в случае прямоугольного плана при одинарной кривизне и относительно легких сетях (максимальный вес 20 кг/м^2) можно было опасаться деформаций при неравномерно распределенной нагрузке (снег) или ветровом отсосе. Очевидно, благодаря кровельному покрытию из листа были образованы жесткие на сдвиг поверхности.

Перекрытие овального здания (рис. 1.21) является комбинацией обеих форм висячих покрытий. Над узкими сторонами, которые имели в плане полукруглую форму, подвешивались сети в форме поверхности двоякой кривизны, а между прямыми сторонами находились две прямоугольные сети с одинарной кривизной (рис. 1.22, 1.23). Внутренние опорные конструкции (70 м длиной, 51 м шириной) состояли из двух решетчатых стоек (высотой 15 м) и одной коньковой шпренгельной балки. Верхнюю часть этой коньковой конструкции шириной 2 м, перекрытую досками, предполагалось использовать как смотровую площадку, на которую должна была вести винтовая лестница (не была возведена) в одной из двух опор.



Рис. 1.21. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Овальный выставочный павильон, внешний вид

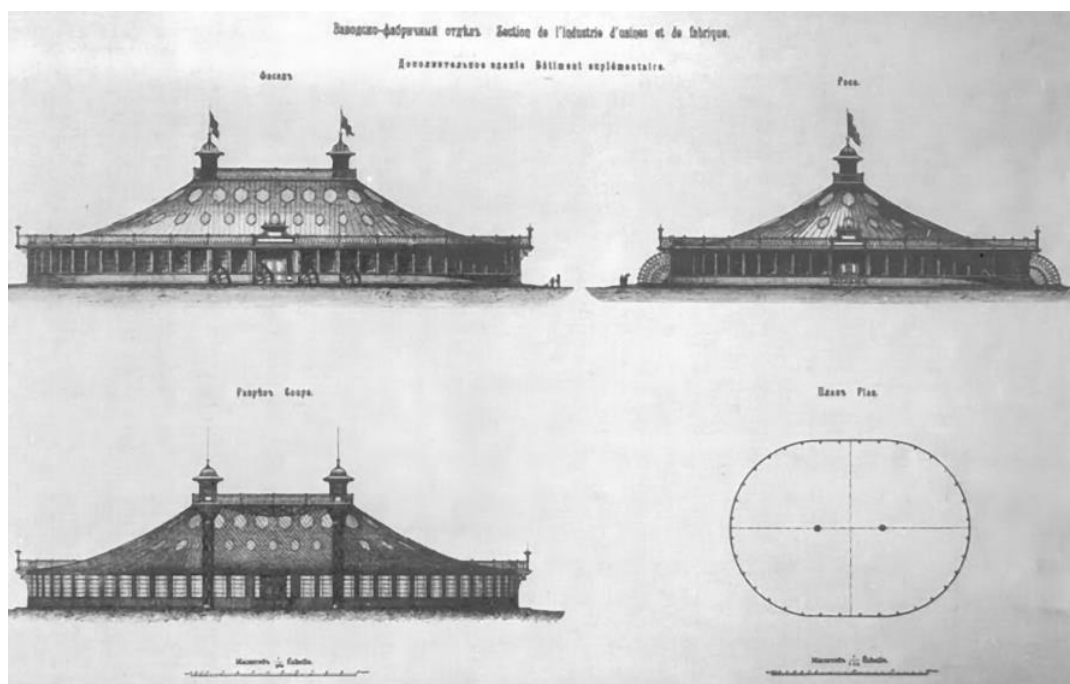


Рис. 1.22. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Овальный выставочный павильон с висячим покрытием; фасады, продольный разрез и план, 1896 г.

Прямоугольные контурные балки в средней части продольной стороны, как и у прямоугольных павильонов, были подперты снаружи двумя трубами, контурные балки в торцах загибались по окружности и образовывали сжатые полукольца. Средние поверхности покрытия одинарной кривизны имели

такую же конструкцию сетки, как и в случае покрытия прямоугольных зданий.

Для поверхностей двойкой кривизны обеих узких сторон должна была быть применена сетка особой формы, так как висячее покрытие перекрывало общий внутренний объем по-другому, чем у ротонды. Полосы сети ближе к середине тесно сближаются друг с другом, так что вблизи мачты образуют почти закрытую поверхность. К наружной кромке здания на удалении 23,5 м они должны были бы подходить с шагом 124 см. Чтобы уменьшить получающиеся в результате этого ячейки в наружной части покрытия, исходящие из центра полосы (76,2 x 4,76 мм) разветвляются примерно на полпути на две более тонкие полосы (50,8 x 4,76 мм), которые образуют сеть с меньшими ячейками. Соединения элементов покрытия с поверхностями одинарной и двойкой кривизны представляют конструктивную проблему из-за различных форм ячеек на обеих сторонах, которые имеют примерно соответствующую друг другу форму поперечного сечения, но разную деформативность под действием внешних нагрузок. Шухов решил эту проблему просто, применив соединительные части в виде стальной полосы (150 x 6 мм) (рис.1.23, 1.24).

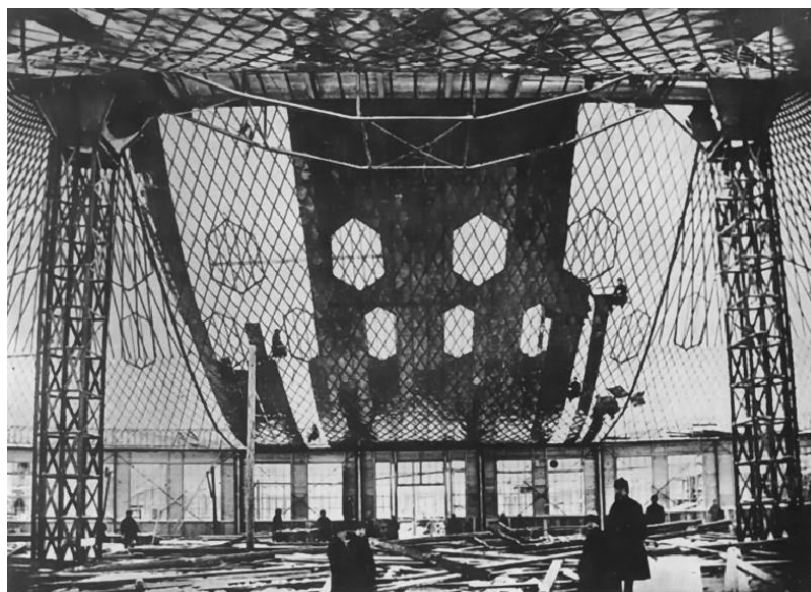


Рис. 1.23. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. выставочный павильон, интерьер во время покрытия сетки кровлей

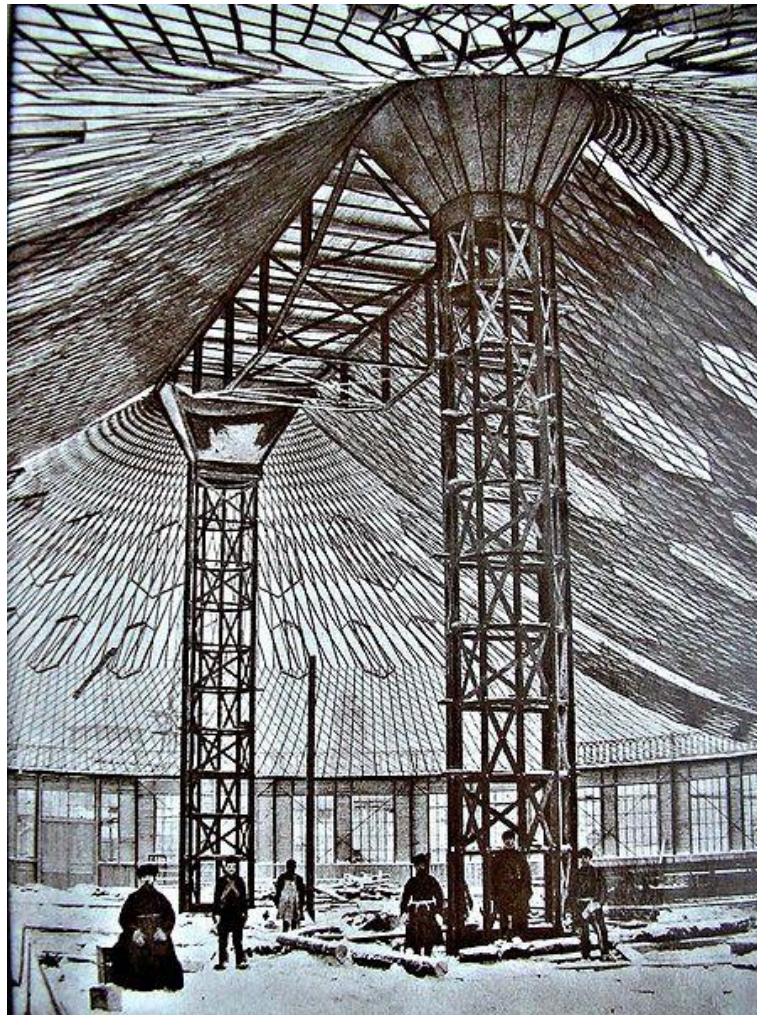


Рис. 1.24. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. выставочный павильон, интерьер во время покрытия сетки кровлей

Вопрос относительно того, как достигается достаточная жесткость в поперечном направлении и как препятствует листовое кровельное покрытие скручиванию оболочки в переходной зоне под нагрузкой, до сих пор остается открытым.

Принципиальное значение висячих конструкций В.Г. Шухова поначалу не было по-настоящему оценено в комитете по устройству выставки. Предполагалось, что висячие сетчатые перекрытия окажутся слишком зыбкими, не смогут оказать должного сопротивления односторонней нагрузке – ветру и снегу. Однако проект был утвержден.

В процессе сооружения павильоны росли с непостижимой быстротой, что отражало одно из достоинств вантовых покрытий – простоту возведения.

Напрасны были и опасения насчет неустойчивости перекрытий В. Г. Шухова, их неспособности выдержать тяжесть снега.

Изготовление и монтаж павильонов были подготовлены и жестко распланированы по времени инженером фирмы Бари Ф. Г. Фарбштейном. В отличие от покрытий обычных выставочных павильонов, которые поставлялись в виде предварительно заготовленных частей, полосовая сталь для висячих покрытий нарезалась по шаблону на строительной площадке на элементы, которые потом монтировались в определенной, постоянно повторяющейся последовательности, что не требовало ни квалифицированных рабочих, ни дорогостоящих приспособлений. Журнал «Технический вестник и сборник промышленности» отмечал, что покрытия, разработанные В. Г. Шуховым, можно возводить при минимальных затратах и стоимости материала, времени и рабочей силы, что для сборки конструкций не требуются опытные рабочие и сложные приспособления, что подъем тяжелых частей на высоту совершенно исключен, «работы идут споро, без задержек».

Таким образом, процесс возведения продемонстрировал дополнительно преимущества такого типа построек.

После триумфа висячих вантовых покрытий на Всероссийской художественной выставке в Нижнем Новгороде 1896 г. вантовые покрытия долгое время в строительстве не применяли. Опасения сводились к тому, что свойства таких покрытий недостаточно изучены, отсутствуют надежные методы расчета.

1.2.2. Развитие зрелищных зданий с вантовыми конструкциями в XX веке

Рассматривая зрелищные сооружения, стоит отметить и такой особый вид сооружений, как зрелищно-спортивные. Крытые стадионы являются одним из тех типов зданий, которые играют значительную роль в градостроительстве и выступают в качестве архитектурно-художественной

доминанты в застройке и планировке городов. Сила воздействия и значимость таких сооружений определяется прежде всего как часть крупных спортивных ансамблей, создание которых требует освоения или реконструкции больших городских территорий, решения различных транспортных проблем и больших работ по их благоустройству.

Арочно-вантовые комбинированные системы относятся к наиболее динамично развивающимся в последнее время у нас в стране и за рубежом прогрессивным конструктивным формам. Их применение открывает широкие возможности создания покрытий, характеризующихся лёгкостью, высокими технико-экономическими показателями, архитектурной выразительностью. Комбинированные системы включают структурно объединённые растянутые элементы (ванты) и элементы, работающие на сжатие и изгиб. В комбинированных арочных системах удастся существенно уменьшить расчетную длину сжато-изогнутой арки за счет введения небольшого количества дополнительных элементов, улучшить её работу на неравномерные нагрузки, рационально использовать растянутые предварительно напряжённые элементы из высокопрочного металла, существенно уменьшить стрелу подъёма конструкции.

Даже простейшие схемы отличаются большой свободой выбора исходных параметров: статической схемой; пролётом; очертанием плана; стрелой подъёма арок и провиса затяжки; соотношением высоты и пролёта конструкции; расположением и количеством дополнительных стержневых элементов (стоек, подвесок и т.п.); применяемыми материалами; методами изготовления и монтажа. Элементарные схемы разнообразными способами объединяются в сложные пространственные структуры [3].

Основной архитектурной особенностью крытых стадионов является их взаимосвязь внешнего и внутреннего образа с принятой конструктивной системой их перекрытия и методами ее возведения. На рис. 1.25 приведены планы и разрезы крытых стадионов, на которых применены сетчатые купола (Дворец спорта в Мехико), подвесные системы в виде гиперболического

параболоида (спортивный зал в Людвигсгафене), седлообразные покрытия (крытая спортивная арена в Рэлее), мембраны (крытые стадионы в Москве, крытый велотрек, универсальный спортзал в Измайлове) и др.

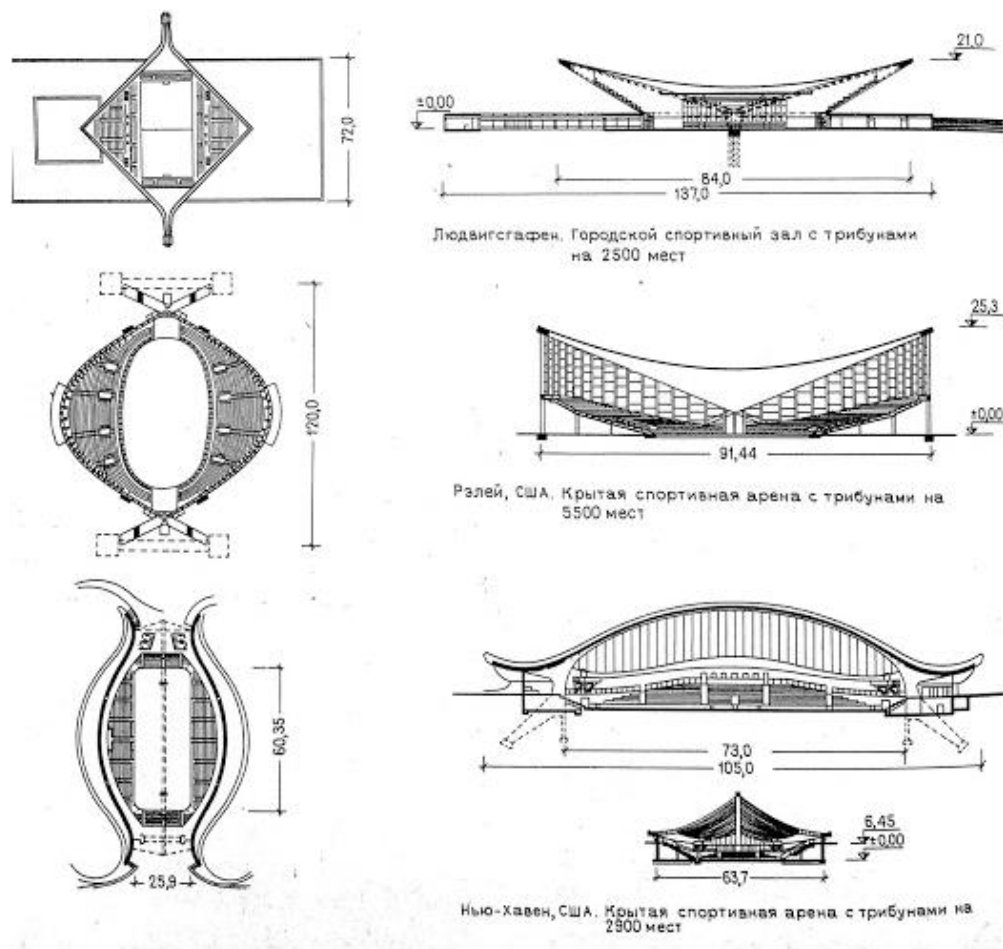


Рис. 1.25. Планы и разрезы крытых стадионов

Крытая спортивная арена в г. Рэлей штата Северная Каролина, США имеет трибуны на 5500 мест. Здание перекрыто однопоясной висячей конструкцией седлообразной формы. Опорами перекрытия являются две наклонные железобетонные арки параболического очертания, пересекающиеся на продольной оси здания.

Крытая спортивная арена в Нью-Хавене (США) имеет трибуны на 2900 зрителей. Здание перекрыто параболической аркой пролетом 79 м с консолями по 12 м, поставленной по продольной оси арены. На арку крепится вантовая конструкция из сетки стальных тросов, поддержанная по наружному контуру здания двумя бетонными стенами.

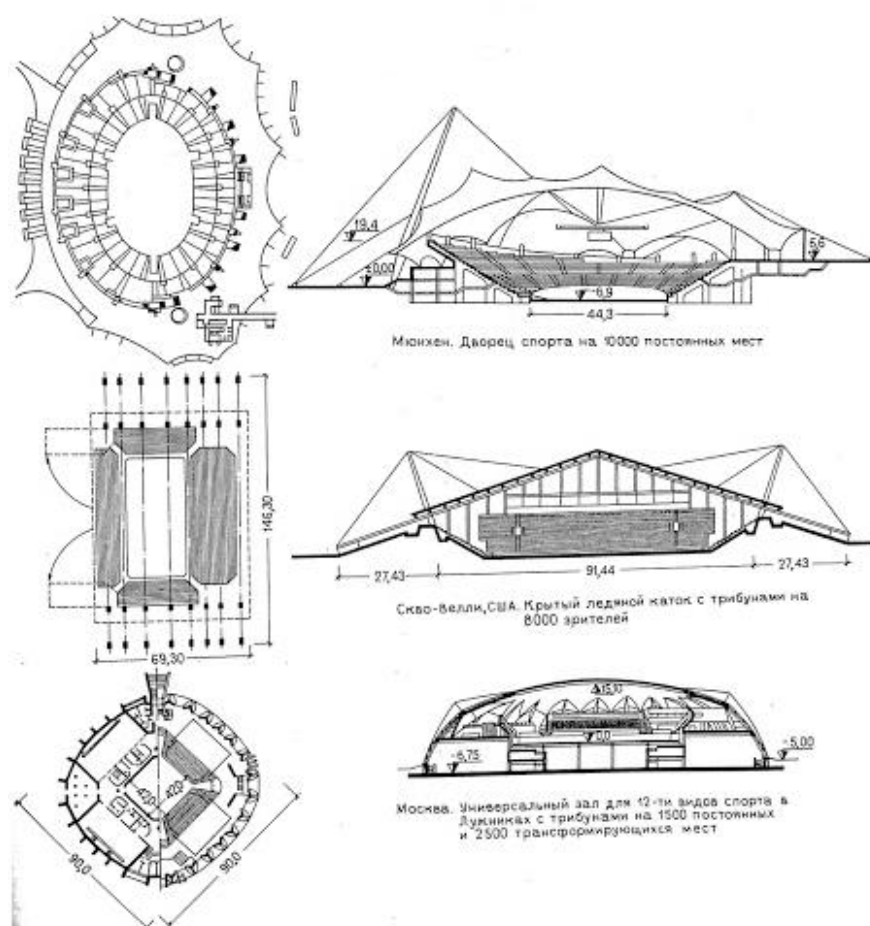


Рис. 1.26. Планы и разрезы крытых стадионов

Дворец спорта в Мюнхене (Германия) рассчитан на 10000 зрителей. Здание перекрыто сетчатым покрытием, подвешенным к стальным мачтам-опорам. Для более мобильного использования зала при проведении зрелищных мероприятий, конгрессов и выставок игровая арена смещена с оси симметрии трибун. Нижний ярус трибун запроектирован разборным, что позволяет размещение на арене велотрека.

Остановимся на рассмотрении самых интересных стадионов, построенных в XX веке.

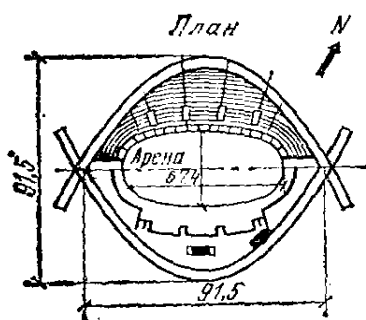
Так идея использования стальных тросов для формирования висячего покрытия по-настоящему возродилась лишь в 1952 – 1953 гг. при строительстве спортивной арены в г. Рэлей, штат Северная Каролина, США (норвежский инженер Фред Северуд, архитекторы Масей Новицки и Уильям Дейтрик). Впервые было разработано покрытие в виде ортогональной вантовой сети, перекрывающее зал размером в плане 91,5×91,5 м.

Данный спортивный зал именуется как «Рэлей-арена» (рис. 1.25).

а)



б)



в)

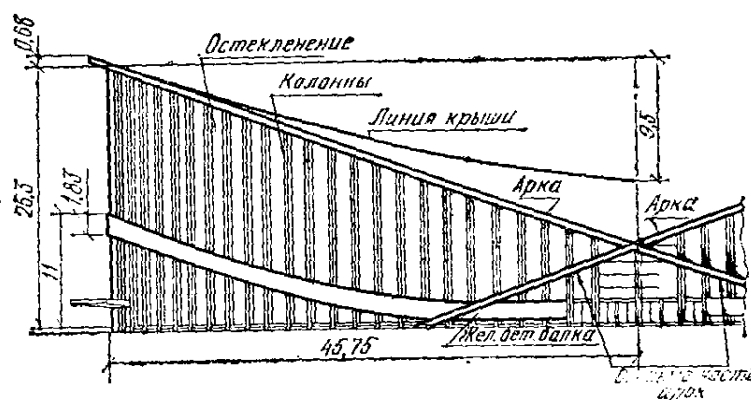


Рис. 1.25. Спортивный зал «Рэлей-арена» с покрытием в виде ортогональной вантовой сети (США): а – общий вид; б – план; в – фасад

Конструкция покрытия состоит из двух наклонных железобетонных арок параболического очертания, между которыми натянуты продольные и поперечные стальные канаты диаметром 18 – 34мм (в зависимости от их длины). Пересекаясь на высоте 8 м, арки подняты на 28 м над уровнем пола. Сетка двойкой кривизны, образующая седловидную поверхность, состоит из системы несущих (выгнутых вниз) тросов и взаимно перпендикулярной ей системы стабилизирующих (выгнутых вверх) тросов, образующих квадратные ячейки размером 1,83×1,83м, по которым уложено легкое покрытие из металлических щитов с утеплителем и гидроизоляцией. Стрелы провеса главных (проходящих через середину покрытия) несущих и стабилизирующих тросов составляет около 1/10 их пролета.

Небольшая собственная масса покрытия (около 30 кг на 1 м²), низкая стоимость сооружения и выразительность седлообразной формы поверхности привлекли внимание архитекторов многих стран. Изящное седловидное сооружение обошло все архитектурные журналы мира и стало образцом для многочисленных подражаний. «Бабочка» вантового покрытия становится традиционным приемом архитектуры спортивных сооружений и залов. В дальнейшем такая форма покрытия нашла свое применение и в общественных сооружениях СССР: киноконцертный зал «Украина» в Харькове, певческая эстрада в Таллине, летний кинотеатр в Баку и др.

Однако начало всестороннему архитектурному освоению инженерной идеи висячего вантового покрытия положил Эеро Сааринен. Вместе с инженером Ф. Северудом он построил хоккейный стадион Йельского университета в Нью-Хейвене, Коннектикут, США (1953–1959), где использовал простой статический принцип (рис. 1.26). Вантовая кровля подвешена с двух сторон к общему «хребту» – железобетонной арке, расположенной по длинной оси сооружения, и закреплена снизу в бетонных конструкциях, образующих криволинейный периметр сооружения. Формируя его торцевые части со входами, пластически развивая массивы низких стенок и дополняя рисунок арки, архитектор добился напряженной драматичности целого.

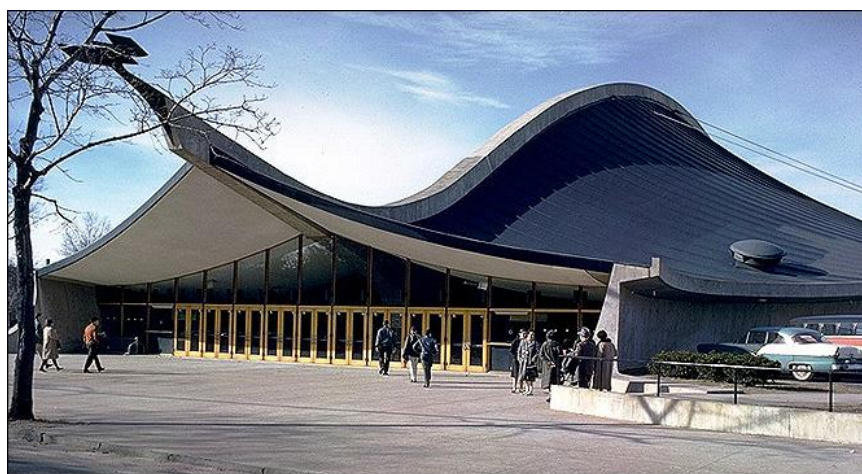


Рис. 1.26. Хоккейный стадион "*Ингаллс Ринк*" с висячим вантовым покрытием Йельского университета в Нью-Хейвене, Коннектикут, США (1953–1959)

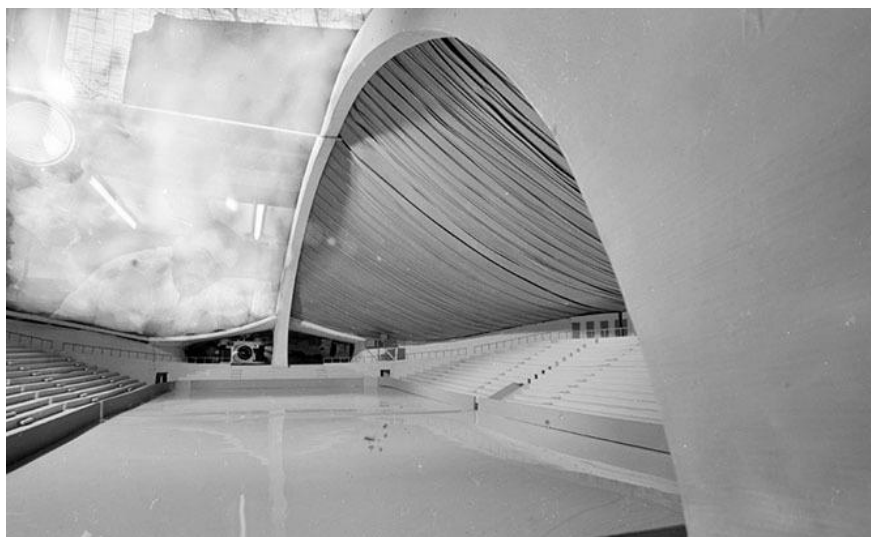


Рис. 1.28. Интерьер хоккейного стадиона "Ингаллс Ринк" с висячим вантовым покрытием Йельского университета в Нью-Хейвене, Коннектикут, США (1953–1959)



Рис. 1.29. Строительство хоккейного стадиона "Ингаллс Ринк" с висячим вантовым покрытием Йельского университета в Нью-Хейвене, Коннектикут, США (1953–1959)

В период с 1968 по 1972 года был построен Олимпийский стадион (нем. Olympiastadion) в Мюнхене, Германия. Стадион расположен в центре Олимпийского парка Мюнхена. Спроектированный немецкими архитекторами Гюнтером Бенишем и Фраем Отто, стадион считался революционным для своего времени. При строительстве были использованы большие навесы из акрилового стекла и стальные ванты, впервые используемые в таком количестве для строительства спортивных

объектов. Широкий и прозрачный купол должен был символизировать новую, демократическую и оптимистичную Германию.



Рис. 1.30. Олимпийский стадион в Мюнхене, Германия (1968–1972)



Рис. 1.31. Олимпийский стадион в Мюнхене, Германия (1968–1972)

Большепролётное светопрозрачное покрытие "Старого Гостиного Двора" в Москве [4, 5]. Здание имеет в плане форму неправильной вытянутой трапеции, застроенной по периметру. Повторяющий форму плана здания внутренний двор с размерами сторон равными 56, 187, 84 и 163 м, площадью почти в полтора гектара перекрыт светопрозрачной стеклянной крышей (рис. 1.32). Основные несущие элементы расположены по большей части покрытия параллельно друг другу с шагом 12,15 м, образуя цилиндрическую поверхность.

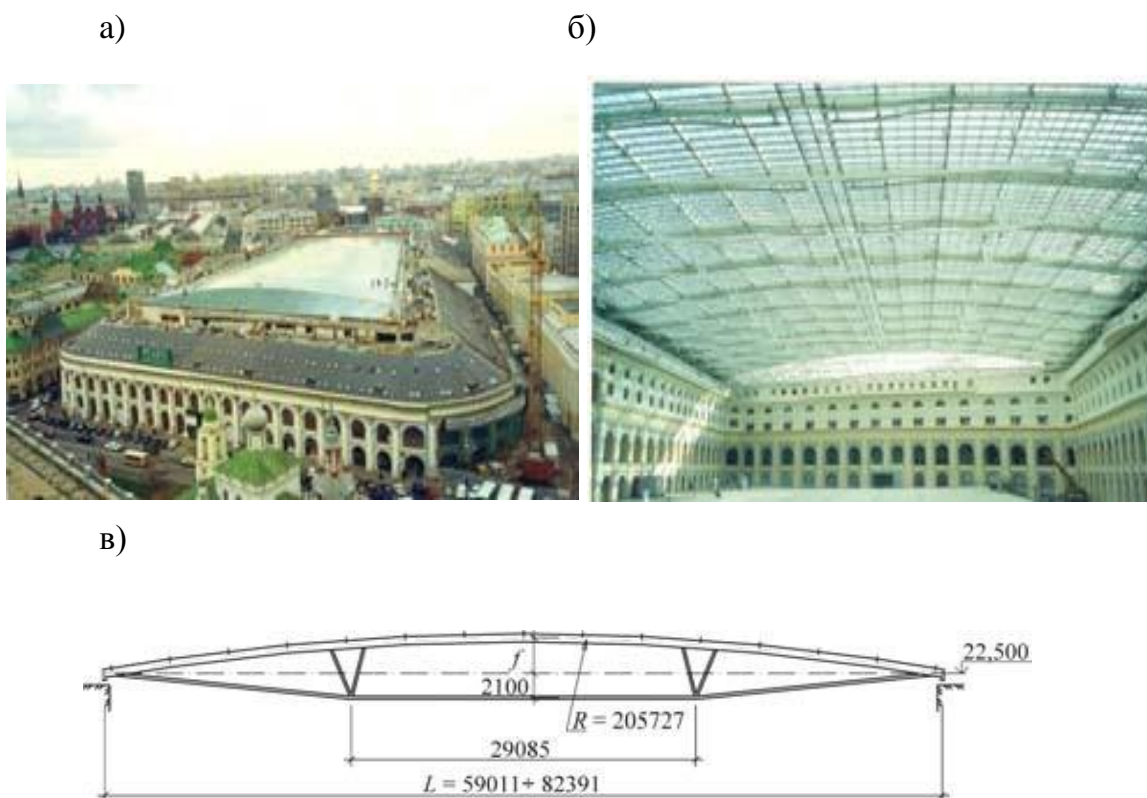


Рис. 1. 32. Гостиный двор в Москве (1998 г.): а – общий вид; б – интерьер; в – несущая конструкция покрытия

В качестве основного несущего элемента покрытия применена комбинированная система, состоящая из выпуклого сжато-изогнутого верхнего пояса, провисающего растянутого нижнего пояса и двух V-образных стоек, объединяющих пояса. Ломаный верхний пояс собран из однотипных прямолинейных элементов длиной 10 м, вписанных в цилиндрическую поверхность постоянной кривизны. Сечение пояса – сварной двутавр высотой 700 мм. Нижний пояс (затяжка) выполнен из двух полос, сечением 40x275 мм. Узлы, объединяющие нижний и верхний пояса (концы фермы), и узлы в местах перелома нижнего пояса и сопряжения с V-образными стойками запроектированы в виде цилиндрических шарниров. Две V-образные стойки – трубчатые ($\varnothing 219 \times 16$) со средними вставками также трубчатого сечения. После укрупнительной сборки фермы она преднапрягалась за счет раздвижки поясов домкратами. Проектная геометрия фермы фиксировалась обваркой вставок V-образных стоек. Несущие комбинированные арки

опираются на распределительную железобетонную балку через шарнирно-неподвижный и шарнирно-подвижный узлы.

Рабочий проект покрытия выпущен ЗАО "Курорт-проект", варианты конструктивных решений на стадии "проект", научно-техническое сопровождение рабочего проектирования, изготовления и монтажа, испытание крупномасштабной модели покрытия выполнены в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко.

1.2.3. Развитие зрелищных зданий с вантовыми конструкциями в XXI веке

Применение вантовых конструкций в XXI веке связано с такими выдающимися архитекторами как Сантьяго Калатрава, Николас Гримшоу.

По проекту испанского архитектора С. Калатравы в 2001 году был построен павильон музея изобразительных искусств в Милуоки, США.

Милуоки, ранее известный исключительно как город пивоваров и промышленников, в настоящее время переживает второе рождение, добавляя в свою историю новые туристические достопримечательности и поистине архитектурные жемчужины.

На берегу озера Мичиган, в восточной части Милуоки, расположен удивительный Музей изобразительных искусств, похожий на гигантскую сказочную белую птицу. Павильон «Куадраччи» представляет собой стеклянную параболическую конструкцию высотой 27,4 м, на опорном контуре которой установлена солнцезащитная структура в форме крыльев. Она состоит из 27 регулируемых по высоте стальных ребер. Легкую и динамичную конструкцию из стекла венчает архитектурное сооружение в форме крыльев под названием «Солнечный бриз». Это главная изюминка белоснежного здания – своеобразные «крылья» раскрываются в солнечную погоду и складываются в пасмурную или просто на ночь.



Рис.1.33. Фасад музея изобразительных искусств в Милуоки, США (2001).

Размах раскрытых крыльев – 66 м, а вес всей конструкции приближается к 90 т. Павильон удостоен целого ряда наград, и не только архитектурных. Кстати, когда Калатрава впервые представил общественности этот проект, многие конструкторы назвали его сумасшедшим. Однако Сантьяго реализовал свой замысел и в очередной раз доказал всем, что даже самые невероятные эскизы можно воплотить в стекле и бетоне.

Крытый конькобежный центр в Челябинске [6]. Здание прямоугольное в плане с размерами 198x84 м. Поперечная рама пролетом 83,4 м включает заземленные в основании стальные решетчатые колонны и шарнирно опертый на них ригель. Строительная высота здания около 10м. Шаг рам – 12м. Пространственная жесткость каркаса обеспечивается конструкцией поперечных рам, системой прогонов, вертикальных и горизонтальных связей по колоннам, стойкам торцевого фахверка и по покрытию. Кровля выполнена из профилированного настила.

Конструкция покрытия (рис. 1.34) аналогична предыдущему объекту. Ригель рамы запроектирован в виде предварительно напряженной комбинированной арки, верхний и нижний пояса

которой, объединены между собой V-образной конструкцией высотой 1286 мм. Нижний пояс выполнен из двух вертикальных полос 30x300 мм, а стойки из труб $\varnothing 219 \times 11$. Узлы перелома нижнего пояса запроектированы шарнирными. Общая высота сквозного ригеля по осям поясов – 8 м.

Рабочий проект покрытия выпущен ЗАО "ЧелябПСК".

а)



б)

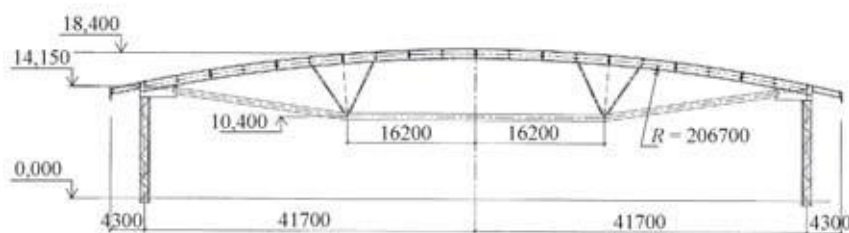
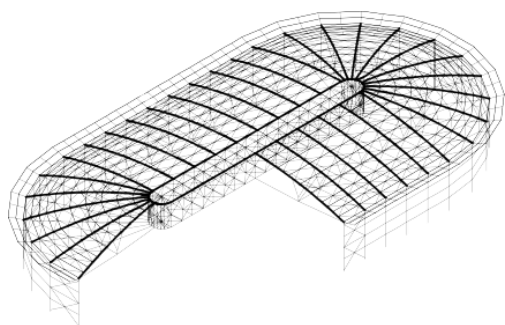


Рис. 1.34. Крытый конькобежный центр в Челябинске (2004 г.): а – монтаж конструкции; б – поперечный разрез

Крытый футбольно-легкоатлетический манеж в Казани [6].
Форма покрытия в плане – овал, включающий центральный прямоугольный участок с двумя полукругами по торцам. Основные размеры покрытия в плане (в осях) 90,7x178 м. По периметру покрытие опирается на колонны (рис. 1.35).

а)



б)



в)

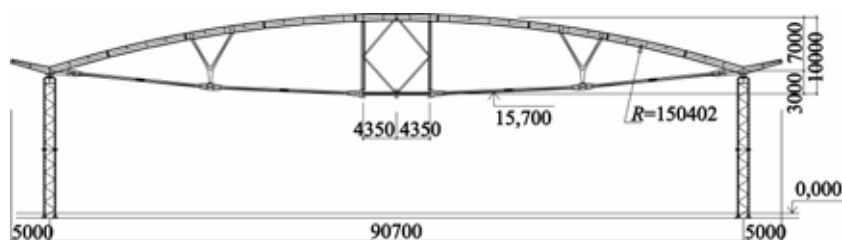


Рис 1.35. Крытый футбольно-легкоатлетический манеж в Казани (2006 г.) а – конструкция покрытия; б – монтаж конструкции; в – поперечный разрез

Несущие стальные конструкции большепролетного покрытия состоят из однотипных элементов, расположенных параллельно шагом 9,7 м в центральной части покрытия и радиально на закругленных торцах сооружения (шаг около 12,95 м по периметру). Основные несущие элементы представляют собой комбинированную конструкцию. Верхний пояс из сварного двутавра высотой 950 мм, имеет криволинейное очертание, с постоянным радиусом кривизны. Провисающий нижний пояс выполнен из двух стальных полос 40х350 мм. Узлы сопряжения нижнего пояса с верхним поясом, Y-образными стойками и нижним поясом центрального ядра – шарнирные. Сжатые Y-образные стойки-распорки, объединяющие пояса, выполнены из сварных двутавров переменного сечения. Ортогональная (радиально-кольцевая) система

несущих элементов покрытия по всей верхней поверхности объединена связями из трубчатых элементов, образующими жёсткий диск. В плоскости нижних поясов, в местах опирания стоек-распорок, установлены кольцевые тяжи. В средней части покрытия расположено центральное ядро длиной 96 м, шириной 8,7 м и высотой 10 м, в виде пространственной стержневой конструкции, состоящей из поясов и стоек двутаврового сечения и связей, обеспечивающих пространственную жесткость системы. Центральное ядро используется для замыкания однотипных несущих элементов средней и торцевых частей покрытия, а также для его монтажа.

Рабочий проект выпущен ООО "ГК-Техстрой", совместно с ЦНИИСК им. Кучеренко, где также выполнено научно-техническое сопровождение изготовления и монтажа несущих металлических конструкций.

В 2007 году был открыт новый стадион Уэмбли, Великобритания. Он был построен на месте старого стадиона Уэмбли. Спроектировала стадион архитектурная фирма Foster and Partners. Здание выполнено из стекла и алюминия и имеет круглую форму в виде чаши. Достопримечательностью стадиона Уэмбли стала необычная арка. Она установлена под углом 68° к горизонту и является важной конструктивной особенностью здания и частью раздвижного механизма крыши. Арка стала опорой для всей северной части крыши и 60% южной. Ее длина составляет 315 м и имеет в диаметре такую же ширину, как ширина железнодорожных путей под Ла-Маншем. Арка является самой длинной однопролетной конструкцией крыши в мире.



Рис. 1.36. Новый стадион Уэмбли



Рис. 1.37. Крупный план арки стадиона Уэмбли

На стадионе Уэмбли предусмотрена система платформ, которая может быть задействована при необходимости использования стадиона для выступления атлетов. При использовании этой системы вместимость стадиона снизится до 60000 мест.

Площадь крыши стадиона составляет 40000м^2 , из них 13722м^2 приходится на передвижные части. Главной причиной для использования раздвижной крыши было стремление избежать тени на футбольном поле, так как травяное покрытие требует прямых солнечных лучей для эффективного роста.

Уэмбли занимает первое место по вместимости в Великобритании и второе в Европе – одновременно стадион может принять 90 тысяч зрителей. На стадионе Уэмбли проводятся домашние игры сборной Англии по футболу, решающие игры внутренних турниров, на нем же прошли финал Лиги Чемпионов УЕФА 2011, футбольные финалы летних Олимпийских игр 2012 года. Стадион Уэмбли известен «аркой Уэмбли» – самой длинной однопролетной конструкцией крыши в мире, имеющей высоту 134 метра.

Крытый конькобежный центр в Крылатском – это первый в России (и десятый по счету в мире) крытый каток с 400-метровой беговой ледовой дорожкой, предназначенный для тренировок спортсменов и проведения

соревнований любого уровня (рис. 1.38). Конькобежный центр представляет собой сегмент круга радиусом 117 м с центральным углом – 160°.

В конькобежном спорте главные события – старты и финиши (на разных дистанциях) – происходят на одной прямой, следовательно, вдоль нее целесообразно организовать как можно больше зрительских мест. Поэтому была выбрана асимметричная (относительно продольной оси беговой дорожки) композиция здания, где вдоль стартово-финишной прямой располагается одноярусная большая (высотой 4 этажа) главная трибуна вместимостью около 4000 мест (31 ряд).

На противоположной прямой предусмотрена трибуна в 10 рядов на 1800 мест (в том числе 33 места для инвалидов-колясочников). На двух виражах расположены трибуны в 5 и 6 рядов общей вместимостью около 1700 мест.

Основными несущими элементами большепролетного покрытия являются стропильные фермы пролетом 2×50,4 м, расположенные веерообразно. Опорами ферм служат наклонные ванты, спроектированные в виде стальных канатов. Своими внешними концами наружные фермы опираются на колонны. Вантовые подвески покрытия крепятся к оголовку пилона с помощью вертикальных ребер и наклонных листовых вставок между ними, вместе они образуют своеобразный «полузонт».

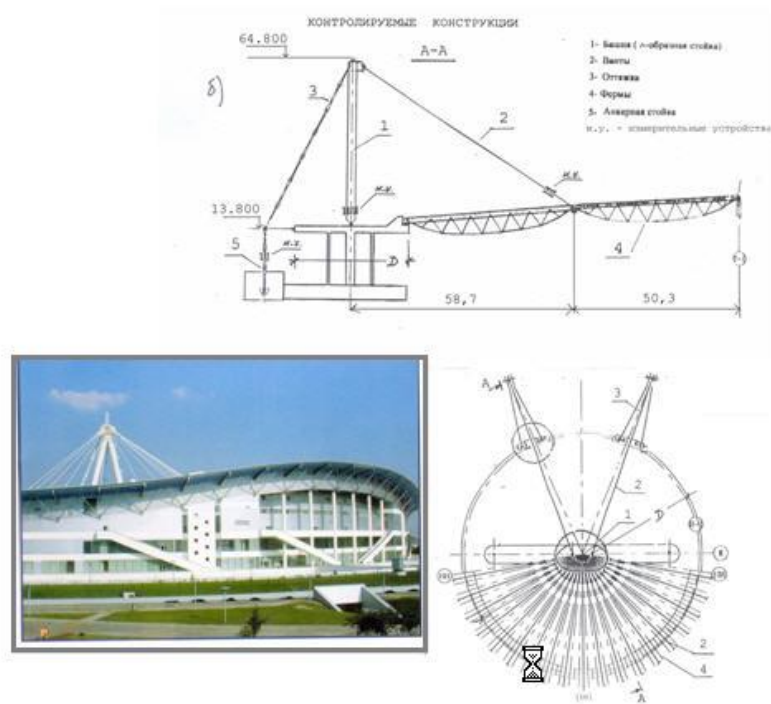


Рис.1.38. Крытый конькобежный центр в Крылатском

Технико-экономические параметры

- Площадь земельного участка – 7,71 га
- Площадь застройки – 26 500 м²
- Общий строительный объем – 394 000 м³
- Объем зала – 297 000 м³
- Общая площадь здания ледовой арены– 37 000 м²
- Площадь зрительских трибун – 4 200 м²
- Открытая автостоянка – 1 500 машиномест

Выводы по главе 1

Вантовые конструкции получили широкое распространение при строительстве зданий с большими пролетами: спортивных залов, стадионов, выставочных залов, кинотеатров, торговых залов, цирков рынков, аэропортов, гаражей, производственных цехов и т.д. Высокая архитектурная выразительность, способность создавать благодаря своей форме благоприятные условия акустики, видимости и освещенности – несомненные достоинства вантовых конструкций. Вантовые конструкции являются оптимальным вариантом для строительства подобных зданий и сооружений.

Вантовые конструкции имеют следующие основные достоинства:

- экономичность;
- небольшая трудоемкость возведения покрытия;
- хорошая транспортабельность покрытия;
- возможность перекрывать большие пролеты без промежуточных опор;
- увеличение эффективности конструкций покрытия с увеличением перекрываемого пролета;
- высокая архитектурная выразительность;
- надежность в эксплуатации.

Но вантовые конструкции имеют и ряд недостатков:

- повышенная деформативность покрытия;
- необходимость устройства в ряде случаев опорных элементов, требующих большого расхода материалов;
- затруднение применения вантовых конструкций в производственных зданиях с крановым оборудованием;
- относительная трудность водоотвода.

Для снижения деформативности покрытия вантовых конструкций производят их стабилизацию следующими способами:

- стабилизация пригрузкой;
- создание двухпоясных систем;

- применение перекрестных систем;
- применение наряду с гибкими вантами жестких элементов;
- применение висячих ферм и балок (жестких вант).

Классификацию вантовых конструкций целесообразно производить по особенностям их элементов, а именно опорного контура и покрытия.

В вантовых конструкциях применяются следующие виды покрытий:

- однопоясные вантовые покрытия с параллельными вантами;
- однопоясные вантовые покрытия с радиальными вантами;
- двухпоясные вантовые покрытия с параллельными вантами;
- двухпоясные вантовые покрытия с радиальными вантами;
- покрытия с вантовыми сетями;
- струнные покрытия;
- покрытия с висячими фермами и балками (жесткими вантами);
- комбинированные системы покрытий (сочетание гибких вант и жестких элементов);
- подвесные покрытия.

Применяются жесткие и гибкие опорные конструкции.

Жесткие опорные контуры вантовых конструкций по форме могут быть плоские и пространственные с прямолинейным и криволинейным, замкнутым и незамкнутым, симметричным и несимметричным очертанием.

К гибким опорным конструкциям относится трос-подбор.

Глава 2. Вантовые конструкции в зрелищных и спортивных зрелищных зданиях и сооружениях: архитектурные, объемно-планировочные и конструктивные особенности

2.1. Объемно-планировочные и архитектурные особенности спортивных зрелищных зданий

Крытые стадионы являются одним из тех типов зданий, которые играют значительную роль в градостроительстве и выступают в качестве архитектурно-художественной доминанты в застройке и планировке городов. Сила воздействия и значимость таких сооружений определяется прежде всего как часть крупных спортивных ансамблей, создание которых требует освоения или реконструкции больших городских территорий, решения различных транспортных проблем и больших работ по их благоустройству. Основной архитектурной особенностью крытых стадионов является их взаимосвязь внешнего и внутреннего образа с принятой конструктивной системой их перекрытия и методами ее возведения.

Эмоциональное воздействие архитектуры интерьеров крытых стадионов бывает даже значительнее впечатления от их внешнего вида. Эта особенность находит свое объяснение в том, что именно внутри ощущается размер перекрываемого пролета и прочитывается принцип работы конструктивной системы. Ярким доказательством могут служить интерьеры плавательного бассейна Йойоги в Токио, Малого дворца спорта в Риме, крытого велотрека в Москве или Дворца спорта в Мехико. Выразительности и красочности интерьеров спортивных сооружений во многом содействует залитая светом хоккейная «коробка» или игровое поле с цветным синтетическим покрытием, с ярко выявленными линиями разметки площадок.

В лучших спортивных сооружениях композиция строится на выявлении работы основных несущих и несомых конструкций. Это отчетливо выражено в сооружениях комплекса Йойоги, куполах римских

крытых стадионах, мембранном перекрытии универсального спортивного зала в Измайлове, мачтах и вантовых сетях покрытия мюнхенских олимпийских сооружений, в предельно ясном и лаконичном образе зимнего стадиона в Скво-Велли (США).

Архитектура нового стадиона Уэмбли представляет собой круглый в плане объем. Визуальная просматриваемость внутреннего пространства создают легкость восприятия достаточно фундаментального здания. Все архитектурные решения в стадионе подчинены четкой симметрии (расположение и конфигурация лестниц, основные входы в здание и др.). Центральным ядром архитектурно-планировочного решения стадиона является чаша трибун футбольного поля размером 105×69 м с зоной безопасности.

Во многих спортивных сооружениях система перекрытий органически связана с их планировочной схемой, в частности, с приемом расположения зрительских мест. Это положение на практике подтверждают такие сооружения, как крытая спортивная арена в Нью-Хавене, где абрис внешнего контура трибун, определенный стеной, на которой закреплено вантовое покрытие, почти совпадает с кривой наилучшего расположения зрительских мест. То же положение имеет место в бассейне Йоюги. Крытая спортивная арена в Рэлее и городской спортивный зал в Людвигсгафене являются примерами полного соответствия выбранной конструкции оптимальному абрису трибун.



Рис.2.1. Плавательный бассейн Йоюги в Токио.

2.1.1. Принцип формообразования вантовых покрытий

На объемно-пространственную структуру зданий, образованных вантовыми конструкциями, влияют следующие особенности структуры здания:

1) форма сооружения в плане;

- криволинейное очертание плана;
- прямоугольное очертание плана;
- произвольное очертание плана.

2) форма геометрической поверхности покрытия:

- плоские;
- цилиндрические;
- поверхности вращения;
- седлообразные;
- складчатые;
- спиральные;
- воронкообразные;

3) форма и вид опорного контура.

В зависимости от вида поддерживаемого покрытия существуют следующие виды опорных конструкций:

- опорные конструкции струнных покрытий;
- опорные конструкции однопоясных и двухпоясных покрытий с параллельными вантами;
- опорные конструкции однопоясных и двухпоясных покрытий с радиальными вантами;
- опорные конструкции вантовых сетей;
- опорные конструкции подвесных покрытий.

Данные особенности структуры здания формируются в зависимости от принятой конструктивной схемы висячих покрытий, которые подразделяются на:

- струнные,
- однопоясные,
- двухпоясные,
- сетчатые,
- подвесные.

2.1.2. Разновидности форм сооружений в плане

Форма плана зданий, образованных вантовыми конструкциями, может быть:

- криволинейная (круг, эллипс, овал, параболоческая кривая, спираль, комбинированная с применением кривых различных форм и др.);
- прямолинейная (квадрат, прямоугольник, трапеция, многоугольник и др.);
- комбинированная (сочетание кривых и прямолинейных элементов).

Таким образом, очевидно, что здания с вантовыми конструкциями могут быть практически любой формы.

Криволинейное очертание плана

Для спортивно-зрелищных залов, выставочных павильонов, рынков, ресторанов, кафе и других общественных зданий и сооружений круглая и овальная конфигурация в плане является наиболее рациональной. Есть и такие типы зданий, например, цирки, планетарии, синерамы, для которых такое очертание плана почти единственно возможное. Центрическая форма плана удовлетворяет различным функциональным и технологическим требованиям и открывает большие возможности для архитектурно-конструктивных решений зданий и сооружений. Примером сооружения с круглым планом может служить ярмарочный павильон в Оклахома-Сити (рис. 2.2).

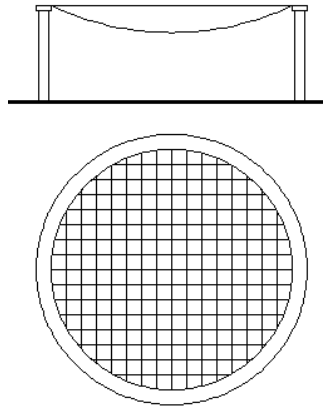


Рис. 2.2. Ярмарочный павильон в Оклахома-Сити с круглым планом

Овальные в плане здания по своей архитектурной выразительности и по функциональным возможностям очень близки к круглым в плане зданиям. Для ряда общественных мероприятий (кино, спорт, концертные представления) они могут оказаться и более рациональными. Для овальных зданий характерны выразительные объемно-пространственные решения. Разные соотношения диаметров овала позволяют находить такие пластические нюансы, которые невозможны в круглых зданиях (рис.2.3).

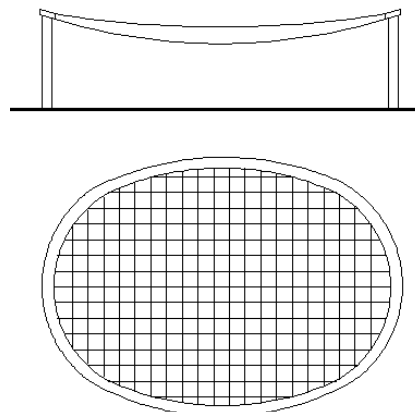


Рис. 2.3. Бассейн в Нейнкирхене с овальным планом

Прямоугольное очертание плана

Прямоугольная и квадратная форма плана (рис.2.4) позволяет блокировать основной объем со вспомогательными помещениями, которые почти всегда сопутствуют зданиям самого различного назначения, развивать первоначальные объемы уже в процессе эксплуатации этих зданий.

Прямоугольными или квадратными в плане могут быть решены почти все основные типы общественных зданий и сооружений: спортивно-

зрелищные, культурно-бытовые, торговые, учебные и т.п. Здания квадратные в плане близки по своему объемно-пространственному решению к прямоугольным зданиям, но по функциональным характеристикам они уступают последним, так как всегда получается жесткая планировка.

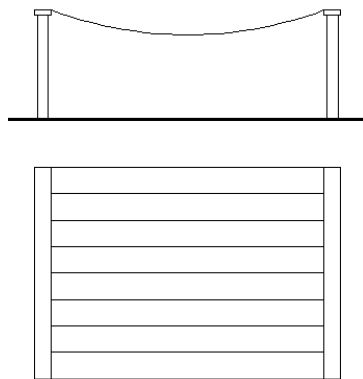


Рис. 2.4. Пример здания с прямоугольным планом

Произвольные очертания плана

Сложные, разнохарактерные технологические и функциональные требования, предъявляемые сегодня к некоторым типам зданий и сооружений, вынуждают архитекторов искать новые, не встречающиеся ранее архитектурно-планировочные и конструктивные решения. Часто функциональная и планировочная схема с большим трудом вписывается в жесткий ритм внутренних опор, в пространство, образованное какой-либо конструкцией большепролетного покрытия. В этом случае ставится задача найти новые архитектурно-планировочные решения зданий или сооружений, отличные от привычных, установившихся четких геометрических форм, внешних контуров, определенных конструктивных схем. В связи с этим в современной архитектуре получили развитие сооружения с произвольной формой плана (рис. 2.5).

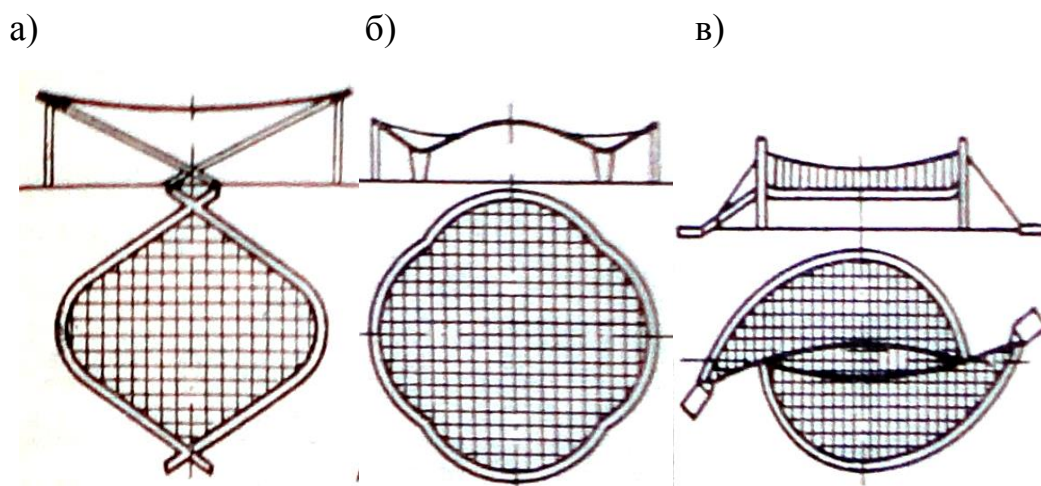


Рис. 2.4. Здания с произвольным очертанием плана:

а – Рэлей-арена; б – стадион в Ростокe; в – плавательный бассейн в Токио

Произвольный план здания или сооружения позволяет нередко осуществить любую планировочную организацию помещений. Такое расположение помещений, не сдерживаемое формой плана и определенное заранее заданной конструктивной схемой, позволяет в ряде случаев получить удобную планировку и вместе с тем найти оптимальную конструктивную форму при архитектурной целостности всего здания или сооружения.

Висячие вантовые конструкции позволяют создавать такие поверхности, которые при произвольном плане могут наиболее полно отвечать как архитектурно-пластическим, так и конструктивным требованиям. Особые трудности возникают при расчете конструкций покрытий. Здание или сооружение с произвольной формой плана может иметь одно целое покрытие, под которым размещаются разнородные помещения, или сочетание элементарных секций, покрывающих отдельные помещения. Оба этих решения обеспечивает определенный архитектурный эффект сооружения.

Для висячих вантовых покрытий характерна широкая палитра конструктивных форм. Чаще всего это сочетания или пересечения в плане частей окружностей, эллипсов, парабол.

Конструкции и архитектурные композиции, созданные на основе произвольного плана, дают разнообразные зачастую совершенно неожиданные объемные решения общественных зданий и сооружений.

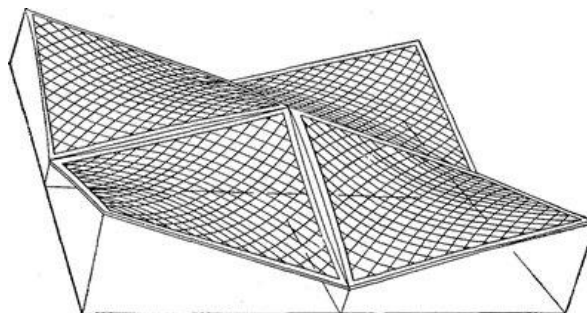


Рис. 2.5. Байтовое покрытие, состоящее из четырех гиперболических параболоидов

Одной из наиболее распространенных поверхностей вантовых покрытий является поверхность гиперболического параболоида. При этом сеть чаще всего представляет собой два семейства взаимно перпендикулярных вант, имеющих максимальную по величине (для данной поверхности) и различную по знаку кривизну. Такие поверхности дают возможность создавать экономичные предварительно напряженные сети, обладающие достаточной жесткостью.

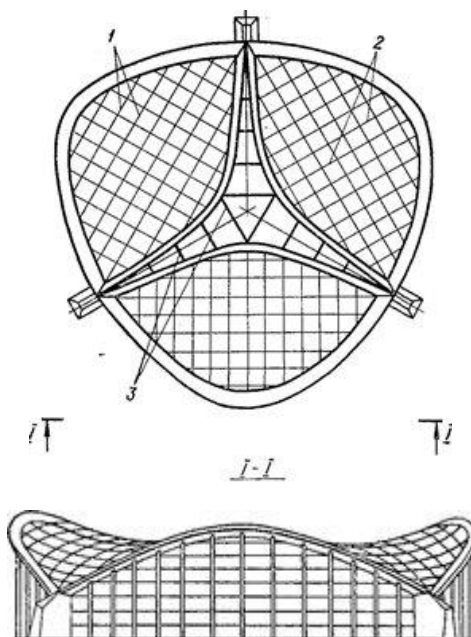


Рис.2.6. Покрытие на опорном контуре в виде трех наружных и трех внутренних пересекающихся арок:

1,2 – напрягающие и несущие ванты; 3– жесткие связи между арками.

Не случайно большинство осуществленных вантовых покрытий имеют поверхность гиперболического параболоида или близкую к нему. Однако применение вантовых сетей, очерченных по поверхности одного параболоида, естественно, ограничивает архитектурные и конструктивные решения покрытий. Поэтому часто используют составные поверхности вантовых сетей, в которых гиперболический параболоид является элементарной составной ячейкой. На рис. 2.6. представлено одно из таких покрытий. Подобные композиции можно образовывать из гиперболических параболоидов на любом плане. При помощи трех гиперболических параболоидов на опорном контуре из пересекающихся арок, наклоненных к горизонту под различными углами, можно образовывать также составную поверхность покрытия (рис. 2.6), Центральные бортовые арки, соединенные между собой, одновременно воспринимают вертикальную нагрузку и, таким образом, дают возможность отказаться от промежуточных опор. Такие схемы целесообразны при перекрытии больших пролетов – от 150 м и более. При перекрытии названных пролетов Байтовым покрытием, очерченным по поверхности одного гиперболического параболоида, перепад высших и низших точек получается огромным, что приводит к бессмысленному увеличению объема здания.

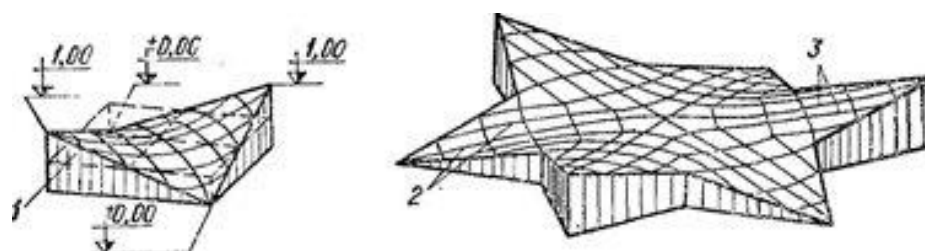


Рис. 2.7. Вантовые сети на кусочно-гладких поверхностях:

а, б – формирование соответственно одного гиперболического параболоида и нескольких: 1 – горизонтальная плоскость; 2,3 – натягающие и несущие ванты

Обычно поверхности рассмотренных схем не являются кусочно-гладкими, когда по линиям сопряжения параболоидов имеются переломы поверхности. Это требует устройства в местах переломов обычно жестких элементов, уравнивающих напряженное состояние поверхности, что вызывает дополнительные затраты материалов, следовательно, уменьшает

эффективность вантовых систем. Оправданными в этом случае являются поиски новых рациональных решений вантовых сетей, которые бы обладали достоинствами сетей гиперболического параболоида и не содержали жестких элементов, кроме опорного контура. Важно также найти общий принцип структурного образования ортогональных сетей на любом опорном контуре.

Если проанализировать формообразование поверхности одного прямого гиперболического параболоида на квадратном плане (рис. 2.7, а), то можно заметить, что его поверхность условно членится на четыре участка, каждый из которых также представляет собой параболоид. Очевидно, такая поверхность не имеет разрыва кривизны, а линии сопряжения участков (в данном случае асимптоты – линейчатые образующие) являются прямыми линиями и находятся в одной горизонтальной плоскости. Следуя замеченной особенности и взяв в качестве основной ячейки гиперболический параболоид на ромбическом плане, можно создать более сложные кусочно-гладкие поверхности. При этом количество сопрягаемых параболоидов должно быть четным и высотные отметки внешних углов опорного контура должны чередоваться. Направляя ванты по линиям максимальных кривизн каждого параболоида, достигаем полного соответствия между структурой сети и поверхностью. Одна из таких сетей представлена на рис. 2.7, б.

Очевидно, что подобный принцип применим при любом очертании в плане опорного контура. Рассмотрим применение этого принципа к сетям на опорном контуре в виде арок.

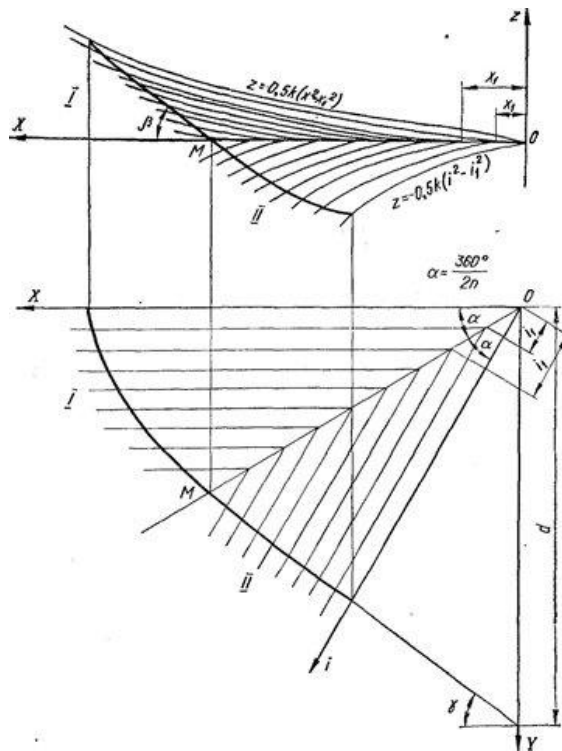


Рис.2.5. К определению очертания опорного контура покрытия с кусочно-гладкой поверхностью гиперболических параболоидов

Схема ортогональной вантовой сети на опорном контуре из двух арок, примененная в выставочном здании г. Рэлей (США), стала классической и занимает одно из главных мест во всем многообразии вантовых покрытий. В ней гармонично сочетаются рациональные формы, поверхность и очертание опорного контура (рис. 1.25). Однако создать рациональную ортогональную вантовую сеть на опорном контуре из трех и более наклонных к горизонту арок, используя лишь два направления нитей относительно всей поверхности, не представляется возможным. В этом случае нити имеют различные кривизны с недопустимо малыми величинами, появляются нежелательные сплюсненные зоны поверхности.

Чтобы избежать таких недостатков, нити необходимо направлять по линиям кривизны в пределах каждого параболоида. В случае арочного очертания опорного контура удобно исходить из параболической формы всех нитей с наперед заданной величиной кривизны. Проследим геометрическое построение опорного контура при любом четном количестве сопрягаемых гиперболических параболоидов, начиная с четырех. Следовательно,

центральный угол каждого параболоида будет равен $\frac{360^\circ}{n}$, где $n = 4, 6, 8, 10, 12$ и т. д., что соответствует 2, 3, 4, 5, 6 и т. д. опорным аркам.

Рассмотрим два смежных полусектора в системе координат ОХУ (рис.5). Вдоль линий кривизны каждого сектора в направлении от центра проведем два семейства конгруэнтных парабол с началом каждой на линии сопряжения параболоидов.

Уравнение семейства парабол первого участка (выше плоскости ХОУ) запишем в виде

$$z = \frac{k}{2} (x^2 - x_1^2). \quad (1)$$

С другой стороны, уравнение арки имеет вид:

$$z = bx - a, \quad (2)$$

где $b = \operatorname{tg} \beta$;

$$y = \sqrt{\frac{a - bx + \frac{k}{2} x^2}{\operatorname{ctg}^2 \frac{360^\circ}{2n} \cdot \frac{k}{2}}}.$$

Путем аналогичных геометрических построений и аналитических выкладок определяем уравнение очертания бортового элемента в проекции на плоскость Х02

$$z = -\frac{k}{2} \left[\left(y \sin \frac{360^\circ}{n} + x \cos \frac{360^\circ}{n} \right)^2 - \left(y \cos \frac{360^\circ}{n} - x \sin \frac{360^\circ}{n} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 \frac{360^\circ}{2n} \right],$$

где $y = d - fx$; $f = \operatorname{tg} \gamma$.

a – участок, отсекаемый проекцией прямой на оси 2. Приравняв левые части и выполнив необходимые преобразования, получаем следующее уравнение очертания бортового элемента в плане (в первом участке):

Задавшись углами наклона P и y , определяем два других параметра k и a . Величина k задается исходя из обеспечения необходимой геометрии покрытия.

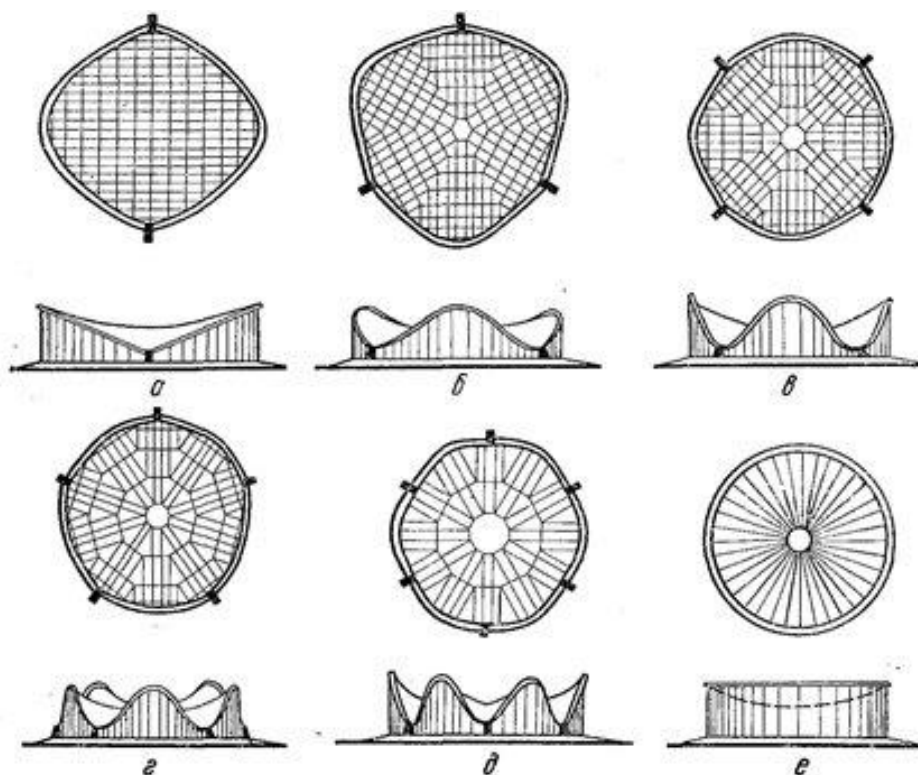


Рис. 2.6. Фазы изменения структуры ортогональной сети в зависимости от увеличения количества аркообразных элементов:
 а – на опорном контуре из двух арок; б, в, г, д – то же, соответственно из трех, четырех, пяти и шести аркообразных элементов; е – радиальная на круглом опорном контуре

Таким образом, опорным контуром покрытия являются не плоские арки, а аркообразные элементы, состоящие из участков (в пределах радиальных секторов) с кривизной в одной из плоскостей – вертикальной или горизонтальной. Образованная по такому принципу поверхность не имеет разрывов кривизны, линии сопряжения параболоидов находятся на одной горизонтальной плоскости, а кривизна поверхности в кольцевом направлении по линиям сопряжения меняет свой знак.

Принцип структурного образования вантовых сетей покрытий лег в основу разработанных ортогональных сетей при количестве аркообразных элементов от двух до бесконечности.

В связи с этим проследим фазы изменения структуры ортогональной сети, поверхности и предварительного натяжения в зависимости от увеличения количества аркообразных элементов (рис. 2.6).

Схема сети на опорном контуре из двух арок может рассматриваться как частный случай предлагаемого принципа образования сетей. Действительно, при $n = 4$ уравнение (4) вырождается в уравнение (2), а это значит, что в данном случае бортовые арки являются плоскими. В других случаях (при $n > 4$) бортовые элементы являются аркообразными.

С увеличением количества аркообразных элементов количество радиальных секторов, в пределах которых принята ортогональная сеть, увеличивается. Это, в свою очередь, ведет к уменьшению влияния предварительного натяжения сети, а при бесконечном возрастании количества аркообразных элементов они образуют замкнутый кольцевой контур. При этом несущие ванты образуют простую радиальную сеть, очерченную по поверхности вращения.

Когда самые низкие и самые высокие точки контура при увеличении количества аркообразных элементов сохраняют свои отметки, возможна вторая форма перехода ортогональных сетей в преднапряженное покрытие, состоящее из прямого и обратного куполов непрерывной радиальной структуры, соединенных непрерывными вертикальными связями типа подвесок. Промежуточные формы этого перехода – покрытия в виде вантовых складок «системы Яверта».

Недостатком фермы Яверта является большой собственный вес, сложность сборки и трудоемкость монтажа. Системы Яверта применяются с целью увеличения жесткости для покрытий с наклонными подвесками. Седловидные висячие покрытия представляют собой системы пересекающихся между собой несущих (нисходящих к середине) и напрягающих (восходящих к середине) тросов. Такие висячие покрытия в виде гиперболического параболоида представляют собой сетку пересекающихся в двух взаимно перпендикулярных направлениях канатов, образуя достаточно жесткую и малочувствительную к неравномерным местным нагрузкам систему, что позволяет избавиться от вибрации за счет собственной пространственной жесткости.

Равнопрочные структуры сетей вантовых покрытий

Большой интерес представляет направление развития конструктивных форм покрытий, сеть которых была бы равнопрочной и обладала свойством уравнивать усилия в элементах при действии произвольной вертикальной нагрузки. Эффект использования прочностных характеристик применяемых материалов в таких сетях будет максимальным.

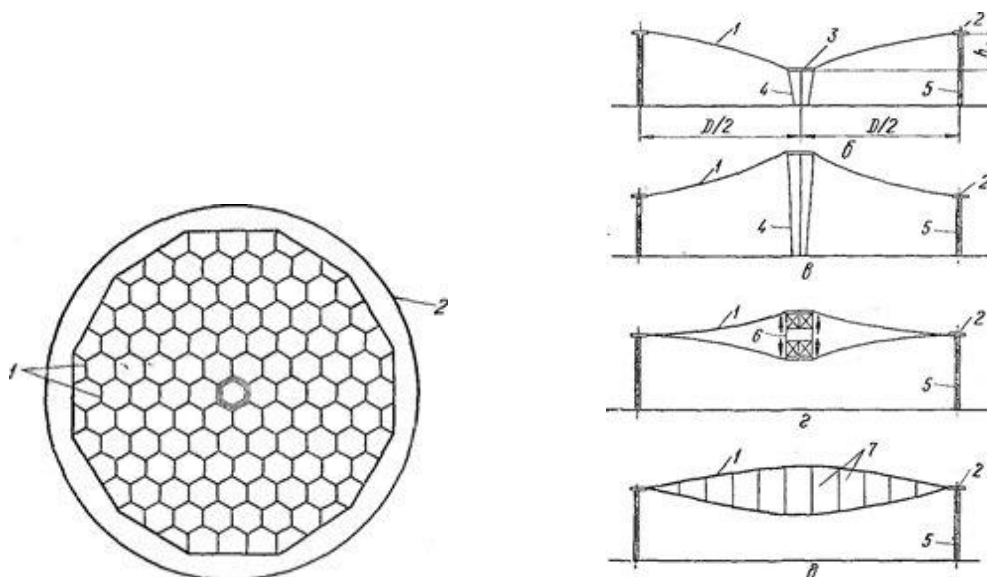


Рис. 2.8. Схемы вантовых покрытий с шестиугольной структурой сети:

а – план; *б, в* – однослойное покрытие соответственно с внутренним и наружным отводом воды; *г, д* – двухслойное соответственно с центральным барабаном и с распорками; *1* – пантовая сеть; *2,3* – соответственно опорные внешний и внутренний контуры; *4* – центральная опора; *5* – наружные опоры по контуру; *б* – раздвижной барабан; *7* – распорки

Рассмотрим пологую систему, состоящую из трех элементов-вант, сходящихся в одном узле под углом 120° друг к другу (рис.2.8). Из условия равновесия узла в горизонтальной плоскости следует, что под действием узловой вертикальной силы горизонтальные составляющие усилий в вантах равны. Присоединяя к каждому свободному концу такой системы последовательно еще по два элемента и соблюдая принятый закон образования узла, можно получить вантовую сеть шестиугольной структуры, обладающую свойством равенства усилий во всех ее элементах. В связи с пологостью поверхности такой сети ее ячейки практически сохраняют в

плане форму правильных шестиугольников как в загруженном, так и незагруженном состояниях. В силу статической определенности работы узлов одинаковые усилия в элементах будут возникать также при действии различных по величине и расположению узловых сил.

Под одинаковыми усилиями подразумеваются усилия, возникающие от одного произвольного нагружения вантовой сети. При количественном и качественном изменении внешней нагрузки соответственно изменяются усилия в элементах, оставаясь при этом равными по всей сети. Аналогичное явление возникает в отдельной пологой гибкой нити, когда при приложении к ней различных по величине вертикальных сил усилие в нити (распор) является по всей длине постоянной величиной. Всю шестиугольную структуру вантовой сети в этом смысле в статическом отношении можно трактовать как пространственную одиночную гибкую нить. Шестиугольная сеть равного натяжения может рассматриваться также как дискретная модель уравнения Лапласа.

Предлагаемая структура дает возможность разработать различные схемы вантовых покрытий (рис. 2.6.)

Однослойное вантовое покрытие с внутренним отводом воды представляет собой систему вант шестиугольной структуры, натянутых на опорный внешний контур, очерченный по окружности. Предварительное натяжение сети осуществляется притягиванием ее к центральной опоре, верх которой располагается ниже положения внешнего опорного контура. Структура сети и принцип предварительного натяжения обеспечивают поверхность вращения отрицательной гауссовой кривизны. Такую же поверхность может иметь лишь радиально-кольцевое шатровое покрытие.

Покрытие с шестиугольной структурой сети является родственным радиальным системам покрытия, однако обладает многими преимуществами. Предварительное натяжение радиальных систем производится путем поддержания растягивающих напряжений в вантах при одновременном замоноличивании швов между железобетонными плитами, поэтому

применение плит заполнения без связи в работе их с вантами невозможно. Предлагаемая схема позволяет применить для ограждающих конструкций панели из синтетических материалов и легких сплавов без обеспечения совместной работы их с вантовой сетью. Величина распора во всех элементах сети постоянна. Это обеспечивает идеальные условия работы опорного контура, являющегося безизгибным при любой неравномерной нагрузке. Применение одного типоразмера ограждающих плит и единой конструкции узлов пересечения вант дает возможность проектировать максимально унифицированные покрытия различных пролетов.

При необходимости наружного отвода атмосферных осадков может применяться схема покрытия, показанная на рис. 2.6, *е*. В этом случае предварительное натяжение сети осуществляется оттягиванием ее от горизонтальной плоскости вверх при помощи центральной опоры.

Возможна схема двухслойного байтового покрытия с использованием шестиугольной структуры сети, каждый слой которой очерчен по поверхности отрицательной кривизны (рис. 2.6, *з*). Предварительное напряжение осуществляется раздвижкой центральных траверс специального барабана при помощи домкратов.

В двухслойном покрытии с поверхностью положительной гауссовой кривизны предварительное натяжение осуществляется постановкой распорок в каждый узел шестиугольной сети. Затруднения конструктивного порядка могут отнести эту схему в область теоретических решений, однако с точки зрения формообразования вантовых покрытий такая схема представляет интерес (рис. 2.6, *д*).

Недостатком сети шестиугольной структуры является ее многодельность, обусловленная тем, что ячейки сети изготавливаются из отдельных сравнительно коротких элементов, которые необходимо соединять в каждом узле. Это обстоятельство затрудняет применение для вант стальных тросов. Поэтому целесообразно создать систему, которая обладала бы свойством сети шестиугольной структуры, но имела бы более

длинные элементы с минимальным количеством сложных узлов пересечения вант. Этой цели отвечают покрытия, схемы которых показаны на рис.8.

Основная идея схемы на рис. 2.9, *а* заключается в том, что два семейства перекрестных вант у контура переходят в систему коротких вант, направленных под углом 120° к основным вантам.

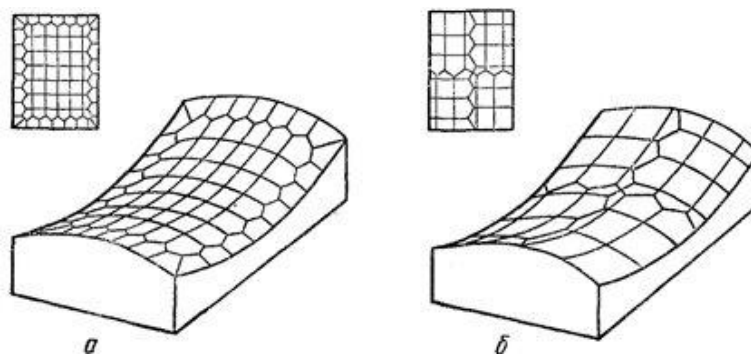


Рис. 2.9. Сети с равными усилиями в элементах:
а – с «выравнивающей» зоной у контура; *б* – то же, в пролете.

Это обеспечивает равенство усилий в вантах, примыкающих к таким узлам, а вследствие проскальзывания перекрестных вант в пролетных узлах – равенство усилий во всех остальных вантах. Форма опорного контура при этом может быть произвольной.

Выравнивание усилий можно получить как для всех элементов сети (путем соответствующего соединения групп вант в углах), так и для двух групп вант – несущих и натягающих. При выравнивании усилий во всех элементах схема имеет повышенную деформативность, так как влияние кривизны нитей на работу проявляется незначительно. По статической работе она аналогична плоской сети с равными усилиями во всех элементах. Очевидно, что более рационально применять схему с выравниванием усилий отдельно для несущих и натягающих вант.

Выравнивание усилий можно достичь не только путем расположения коротких элементов указанной структуры у контура, но и в пролете перекрестных систем и систем с параллельными нитями (рис. 8, *б*). Эти схемы эффективны при восприятии односторонних и неравномерных нагрузок. Принцип выравнивания усилий путем создания небольшой специальной приконтурной или пролетной зоны можно распространить и на

другие схемы покрытий. В частности, можно проектировать двухслойные системы.

К качественно новым результатам приводит применение принципа выравнивания усилий к сетям треугольной структуры. Если однослойную вантовую сеть треугольной структуры «раздвинуть» в узлах вертикальными распорками таким образом, чтобы ванты трех направлений попеременно опирались в верхних и нижних узлах распорок и примыкали бы к узлам под углом в плане 120° друг к другу, получаем важное свойство такой схемы (рис. 2.10): при действии любой вертикальной нагрузки усилия в вантах будут уравнены по трем группам, так как существует всего три независимых направления, образующих замкнутые шестиугольники. Каждый конец распорки развязан в трех направлениях, составляющих в плане углы 120° , причем направления примыкания вант у верхних и нижних узлов повернуты в плане на 60° относительно друг друга.

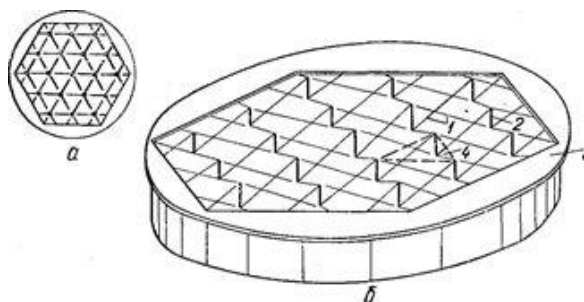


Рис. 2.10. Вантовое покрытие с выравниванием усилий по трем группам элементов:
a – план; *б* – аксонометрия: 1 – ванты; 2 – распорки; 3 – бортовой элемент; 4 – плита

Эта схема относится к классу пологих систем. В стадии предварительного напряжения предлагаемая схема обеспечивает наличие всего одного типа усилий во всех элементах, что значительно облегчает выполнение предварительного напряжения. Варьируя длину распорок, можно обеспечить соответствующую форму покрытия.

Вантовые покрытия относятся к классу так называемых мгновенно-жестких систем и даже при наличии предварительного напряжения обладают повышенной деформативностью. Этот недостаток является главным препятствием в случае применения вантовых систем для перекрытий,

требования к жесткости которых более повышены. В определенной мере он устранен в схеме (рис. 2.11), образованной путем соединения по вертикали двух сетей по рис. 2.10 таким образом, что нижние узлы распорок верхней сети совпадают с верхними узлами распорок нижней сети, т.е. путем параллельного переноса по вертикали нижней сети на величину высоты распорки.

Верхние и нижние узлы распорок по-прежнему раскреплены в трех направлениях, а средний узел раскреплен шестью вантами. Образованная таким образом схема обладает важным свойством – геометрической неизменяемостью, а следовательно, повышенной жесткостью. В силу структуры сети равенство усилий достигается лишь в каждом трех вантах, примыкающих к верхним или нижним узлам распорок.

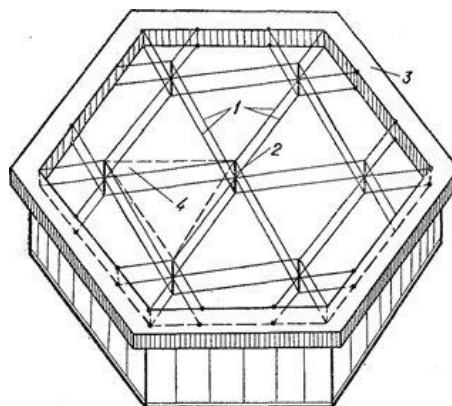


Рис. 2.11. Байтовое покрытие треугольной структуры повышенной жесткости:

1 – ванты; 2 – распорка; 3 – опорный контур; 4 – сборная плита

2.2. Конструктивные особенности спортивных зрелищных зданий

2.2.1. Конструктивные элементы и детали вантовых покрытий

Проволочные тросы (канаты)

Основной конструктивный материал вантовых покрытий изготавливается из стальной холодноотянутой проволоки диаметром 0,5 – 6 мм, с пределом прочности до 220 кг/мм. Различают несколько типов тросов:

– спиральные тросы (рис. 2.12,а), состоящие из центральной проволоки, на которую спирально навиты последовательно в левом и правом направлении несколько рядов круглых проволок;

– многопрядевые тросы (рис. 2.12,б,в), состоящие из сердечника (пенькового каната или проволочной пряди), на который навиты односторонней или перекрестной круткой проволочные пряди (пряди могут иметь спиральную свивку). В этом случае трос будет называться спиральнопрядевым;

– закрытые или полузакрытые тросы (рис. 2.12,г,д), состоящие из сердечника (например, в виде спирального троса), вокруг которого навиты ряды проволок фигурного сечения, обеспечивающие их плотное прилегание (при полузакрытом решении трос имеет один ряд навивки из круглых и фигурных проволок);

– тросы (пучки) из параллельных проволок (рис. 2.13,е), имеющие прямоугольное или многоугольное сечение и связанные между собой через определенные расстояния или заключенные в общую оболочку;

– плоские ленточные тросы (рис. 2.14,ж,з), состоящие из ряда витых тросов (обычно четырех прядевых) с попеременной правой или левой круткой, связанных между собой одинарной или двойной прошивкой проволокой или тонкими проволочными прядями, требуют надежной защиты от коррозии. Возможны следующие способы антикоррозийной защиты тросов: оцинкование, лакокрасочные покрытия или смазки, покрытие

пластмассовой оболочкой, покрытие оболочкой из листовой стали с нагнетанием в оболочку битума или цементного раствора, обетонирование.

Окончания тросов должны быть выполнены таким образом, чтобы обеспечивать прочность окончания не меньше прочности троса и передачу усилий от троса на другие элементы конструкции.

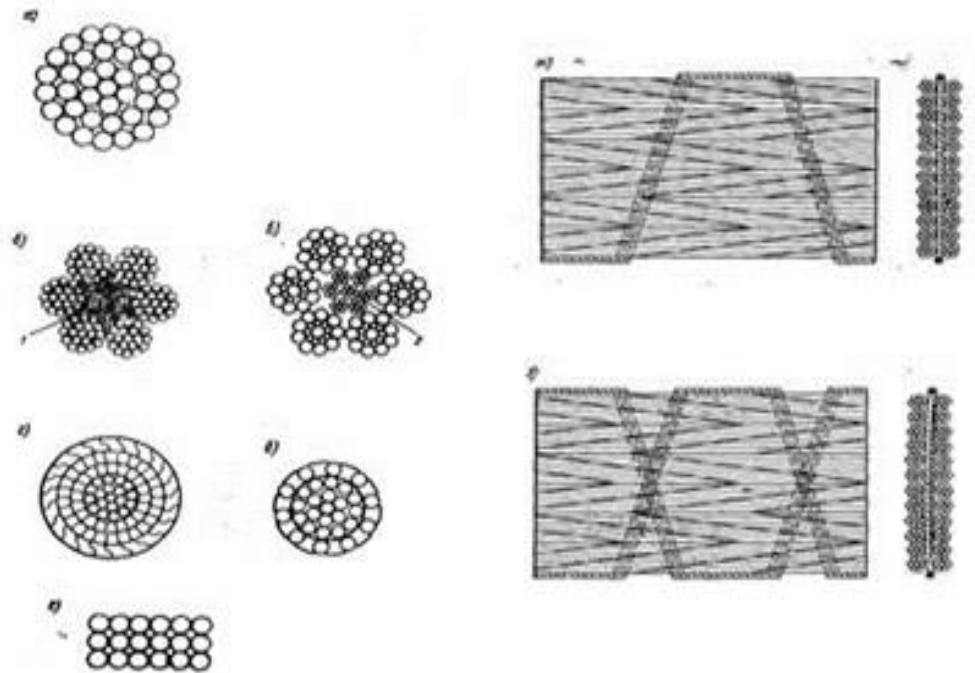


Рис.2.12. Типы проволочных тросов

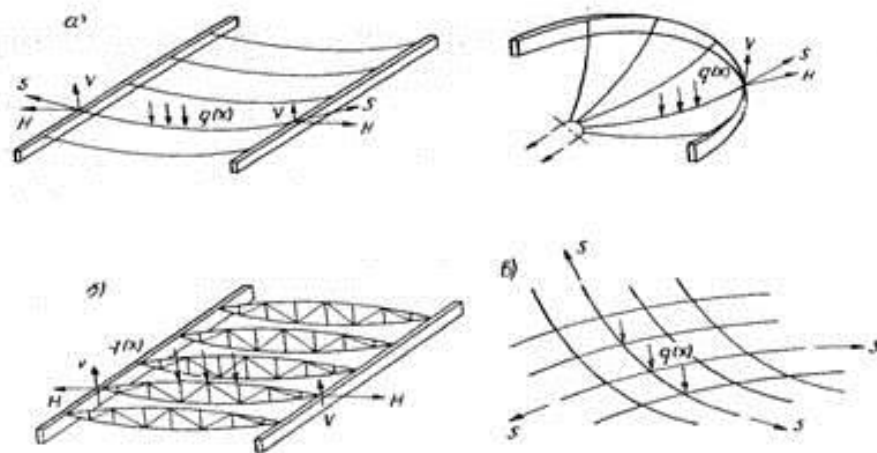


Рис.2.13. Основные типы вантовых систем

Концевое крепление тросов

Традиционный вид концевого крепления тросов – петля со сплеткой (рис. 2.14, а), когда конец троса распускается на пряди, которые вплетаются в

трос. Для обеспечения равномерной передачи усилия в соединении в петлю вкладывают коуш. По длине тросы сращивают также сплеткой, кроме закрытых соединений.

Вместо сплетки для скрепления и сращивания тросов часто применяют зажимные соединения:

- запрессовывание обеих ветвей троса при петлевом креплении в овальную муфту из легкого металла, внутренние размеры которой соответствуют диаметру троса (рис. 2.14, б);

- винтовые соединения, когда конец троса распускают на пряди, которые укладывают вокруг стержня с винтовой нарезкой, а затем запрессовывают в муфту из легкого металла (рис. 2.14, в);

- крепление посредством хомутов (рис. 2.14, ж), не рекомендуемых для напряженных тросов вантовых покрытий, так как они с течением времени ослабевают;

- крепление тросов с заливкой металлом, когда конец троса расплетают, очищают, обезжиривают и помещают в коническую внутреннюю полость специальной муфты-наконечника, а затем заливают муфту расплавленным свинцом или сплавом свинца с цинком (возможна заливка бетоном);

- клиновые крепления тросов, редко применяемые в строительстве;

- стяжные муфты, применяемые для корректировки длины тросов при монтаже и их предварительного натяжения.

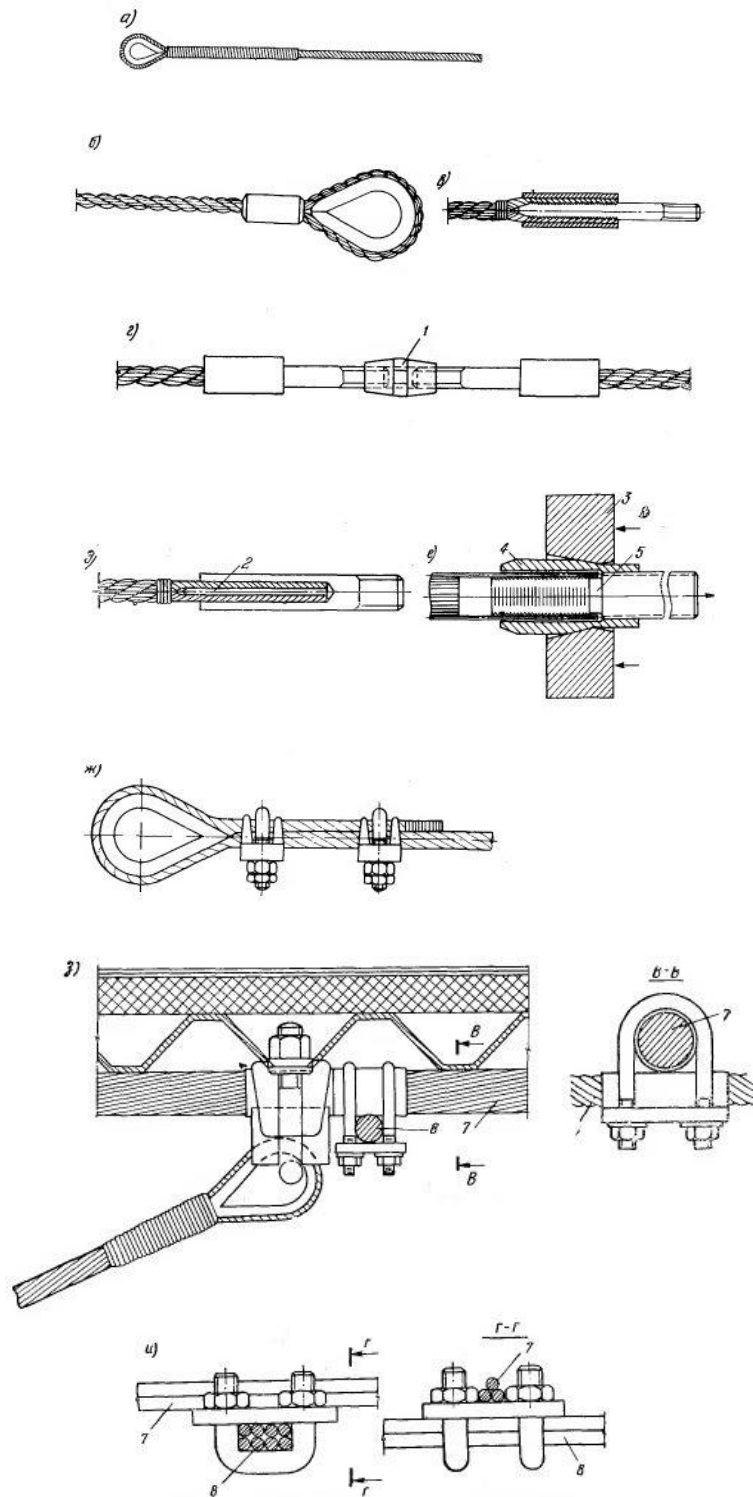


Рис.2.14. Виды концевых креплений и соединений проволочных тросов

а – петля со сплеткой; б – петля с обжимной муфтой; в – обжимная муфта с нарезным стержнем; г – сращивание тросов по длине (1– стяжная муфта); д – обжимная гильза (2 – стальной стержень); е – устройство обжимной муфты (3 – оправка; 4 – муфта; 6 – нарезной стержень); ж – петля с хомутами; з – соединение несущих и натяжных тросов покрытия Рэлей-арены США; и – то же, покрытия выставочного зала в Лесковаце, Сербия (7 – несущий трос; 8 – стабилизирующий трос)

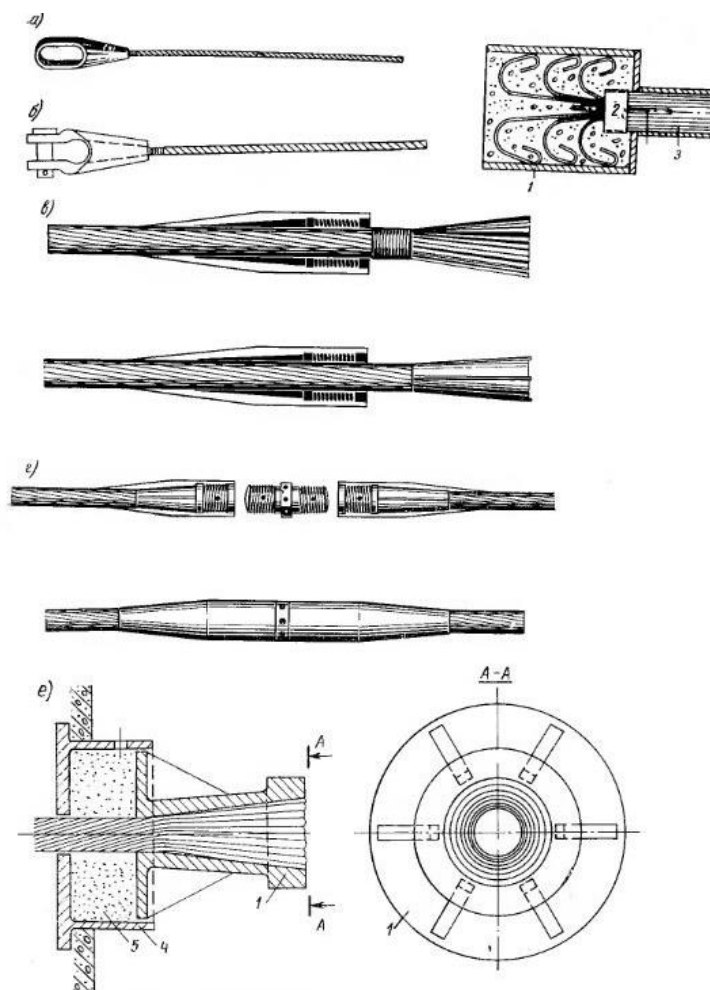


Рис.2.16. Концевые крепления тросов с заливкой

а – муфта с кольцом; б – муфта с проушинами; в – муфта с резьбой (до и после заливки); г – сращивание тросов по длине; д – анкеровка троса с заливкой бетоном; е – то же, с заливкой металлом. 1 – гильза; 2 – кольцо; 3 – стальной стержень; 4 – анкерный цилиндр; 5 – заполнение песком

Анкерные узлы

Анкерные узлы служат для восприятия усилий в тросах и передачи их на опорные конструкции. В предварительно-напряженных вантовых покрытиях они используются также для предварительного натяжения тросов.

На рис. 2.15,а показана анкеровка радиального троса кругового вантового покрытия в сжатом опорном кольце. Чтобы обеспечить свободное перемещение троса при изменении угла его наклона, в опорном кольце и примыкающей к нему оболочке покрытия устроены конические гильзы, заполненные битумом. Жесткое опорное кольцо и гибкая оболочка разделены деформационным швом.

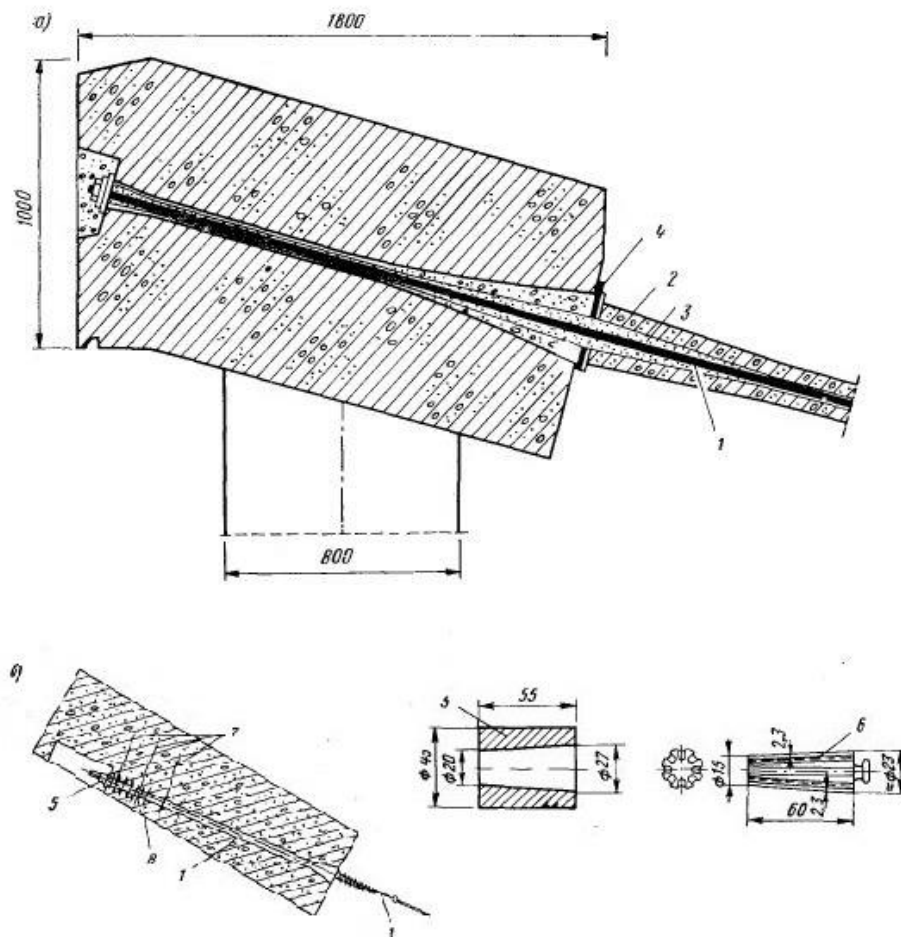


Рис. 2.17. Виды узлов вантовых покрытий

а – в сжатом опорном кольце кругового покрытия; б – в опорной арке покрытия; 1 – трос; 2 – трубка из листовой стали; 3 – заливка битумом; 4 – резиновая прокладка; 5 – коническая муфта; 6 – клин; 7 – хомуты; 8 – спиральная арматура

Покрывтия и кровли

Вантовые конструкции более деформативны, чем другие типы конструкций; поэтому и покрытие по вантам должно быть достаточно гибким, чтобы под нагрузкой в нем не образовывались трещины и не раскрывались швы. Кровли по вантовым покрытиям выполняются из стальных или алюминиевых листов, асфальтной или битумной массы, рубероида, технических тканей и т.п. В зависимости от назначения сооружения покрытие может быть теплым или холодным.

В зависимости от типа вантовой системы применяют тяжелую либо легкую конструкцию покрытия.

Тяжелые покрытия. Масса их достигает 170–200 кг на кв.м; выполняют их преимущественно из железобетона. Иногда используют армированный лёгкий бетон. Для сборных покрытий иногда применяют плоские плиты, но в основном ребристые, толщиной (между ребрами) 25 – 35мм. Плиты могут иметь прямоугольное или трапециевидное очертание, в зависимости от расположения тросов. Сборные плиты обычно подвешивают между тросами; швы между плитами замоноличивают (рис. 2.18, а,б).

При устройстве предварительно-напряженных висячих покрытий одинарной кривизны ванты выполняют из круглой стали и размещают в ребрах, собираемых из отдельных железобетонных элементов; в этом случае плиты укладывают непосредственно по ребрам (рис. 2.18, в).

Если покрытие выполнено в монолитном железобетоне, то бетон укладывают по опалубке, размещаемой ниже тросов либо между ними.

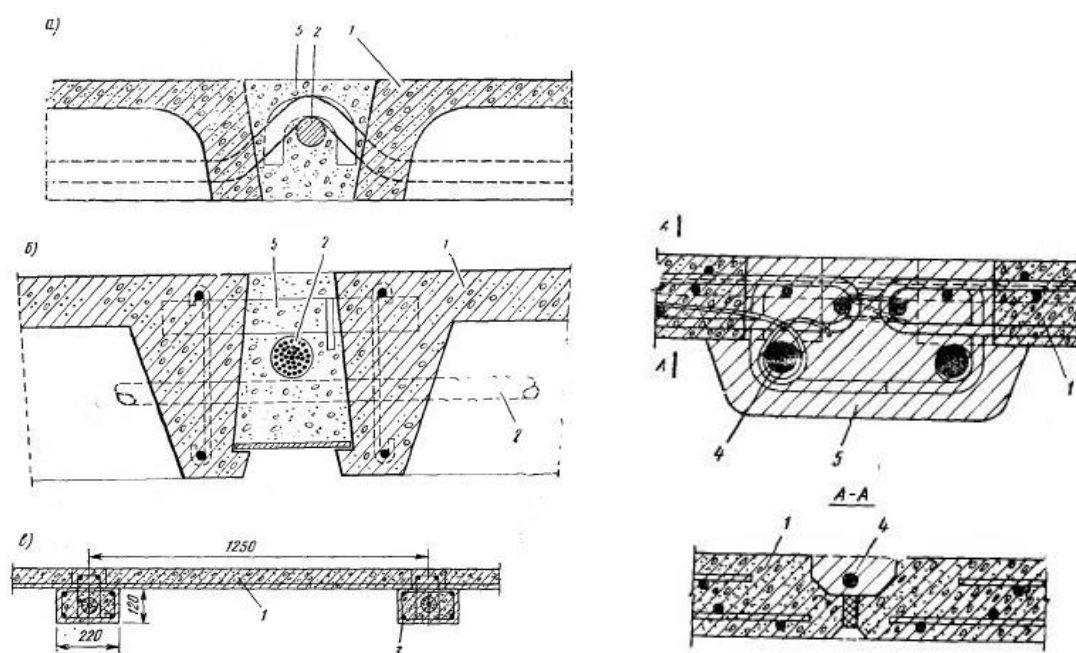


Рис. 2.18. Узлы вантовых покрытий с заполнением из сборных железобетонных плит
 а – подвеска плит к радиальным тросам кругового покрытия; б – то же, к тросовой сетке; в – укладка плит по сборным предварительно напряженным железобетонным ребрам; г – укладка плит по стержневым вантам с устройством монолитных ребер;
 1 – сборные плиты; 2 – тросы; 3 – сборные ребра; 4 – напряженные стержни; 5 – монолитный бетон

Легкие покрытия. Максимальная масса таких покрытий 40 – 60 кг на кв.м. Железобетон используется редко. Заполнение покрытия выполняют из крупноразмерных стальных или алюминиевых профилированных листов (рис. 2.19), которые служат одновременно и несущими элементами ограждения, и кровлей, если теплоизоляция отсутствует или размещается снизу (рис. 2.19, а,б).

Многие вантовые покрытия выполняются с деревянным заполнением; преимущество такой конструкции является малая масса, простота изготовления и возможность использования готовых сборных элементов.

Перспективны для вантовых конструкций пластмассы, в том числе стеклопластиковые панели и ткани с полимерными покрытиями.

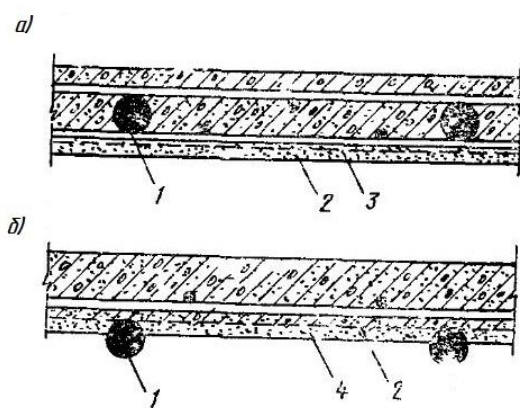


Рис. 2.18. Сечения монолитных железобетонных висячих оболочек

а – с размещением напряженных стержней в толще оболочки; б – то же, под оболочкой (1 – напряженные стержни; 2 – стальная сетка; 3 – торкрет-бетон; 4 – штукатурка)

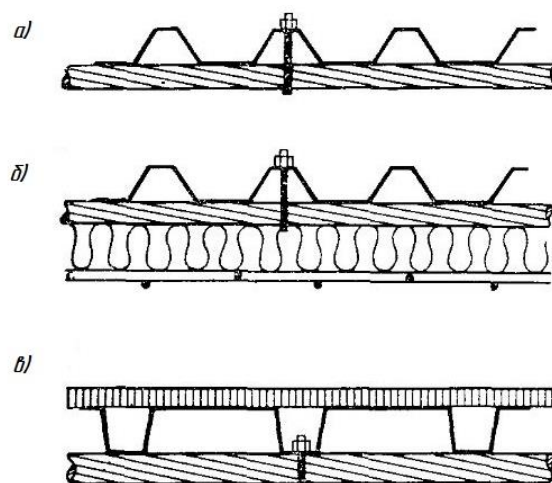


Рис. 2.19. Сечения покрытий из профилированного металлического настила по вантам

а – без теплоизоляции; б – с расположением теплоизоляции под настилом; в – укладкой теплоизоляции по настилу

При большом расстоянии между тросами несущие элементы заполнения выполняют в виде стальных рам (из гнутых или прокатных профилей), к которым крепят профилированные или плоские листы.

Выводы по главе 2

1. На объемно-пространственную структуру зданий, образованных вантовыми конструкциями влияют:

- 1) форма сооружения в плане;
- 2) форма и вид опорного контура;
- 3) форма геометрической поверхности покрытия.

Данные особенности структуры здания формируются в зависимости от принятой конструктивной схемы висячих покрытий, которые подразделяются на:

- струнные,
- однопоясные,
- двухпоясные,
- сетчатые,
- подвесные.

2. Форма плана зданий, образованных вантовыми конструкциями, может быть:

- криволинейная (круг, эллипс, овал, параболоческая кривая, спираль, комбинированная с применением кривых различных форм и др.);
- прямолинейная (квадрат, прямоугольник, трапеция, многоугольник и др.);
- комбинированная (сочетание кривых и прямолинейных элементов).

На основе проведенного анализа возможных вариантов очертания в плане зданий с вантовыми конструкциями можно заключить следующее:

- круглые и овальные планы имеют при одинаковой полезной площади наименьшую площадь ограждения (стены, остекление) и лучшие технико-экономические показатели по конструктивным схемам;
- прямоугольные и квадратные планы имеют большую площадь ограждения, но для зданий сравнительно небольших пролетов (12–60 м) они могут найти широкое применение;

- произвольный план дает простор для творческой фантазии инженера и архитектора и свободу для функциональной организации сооружений, однако при этом необходимо избегать чисто формальных поисков новых решений.

3. Каждая конструктивная схема вантового покрытия требует применения определенного вида опорных конструкций.

Однопоясные и двухпоясные покрытия с радиальным расположением вант:

- наружный опорный контур (замкнутый или разомкнутый, жесткий или гибкий);

- внутренний опорный контур (свободно висящее металлическое кольцо или кольцо на опорной стойке, раздвижной барабан), возможен вариант его отсутствия при определенных конструктивных условиях.

Библиографический список

1. Беленя, Е. И. Металлические конструкции: Спец. курс. Учеб. пособие для вузов/Е. И. Беленя, Н. Н. Стрелецкий, Г. С. Ведеников и др.; Под общ. ред. Е, И. Беленя – 2-е изд., перераб, и доп. – М.: Стройиздат, 1982. – 472 с.
2. Горев, В.В., Уваров, Б.Ю. и др. Металлические конструкции. Конструкции зданий: Учеб. для строит. вузов. – М.: Высш. шк., 2002. – 528 с.: ил.
3. Горенштейн, Б. В. Железобетонные пространственные конструкции для строительства на Севере. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1979. – 160 с, ил.
4. Грефе, Р., Гаппоева, М.М., Перчи, О. В.Г. Шухов (1853–1939). Искусство конструкции: Пер. с нем./Под ред. Р. Грефе, М. Гаппоева, О. Перчи. – М.: Мир, 1995. – 192 с, ил.
5. Демина, А. В. Здания с большепролетными покрытиями: Учеб пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 88 с.
6. Казбек-Казиев, З.А., Беспалов, В.В., Дыховичный, Ю.А. и др. Архитектурные конструкции. Москва, «Высшая школа», 1989 г.
7. Канчелн, В.Н. Строительные пространственные конструкции: Учеб. пособие. – М.: Издательство АСВ, 2003. – 112 с.
8. Кирсанов, Н.М. Висячие и вантовые конструкции: Учеб. пособие для студентов строит. спец. вузов / Н.М.Кирсанов. – М. : Стройиздат, 1981. – 159 с.
9. Руле, Г. Пространственные покрытия (конструкции и методы возведения). 2 том. М.: Стройиздат, 1974. – 247с. Таб.30. ил. 413.
10. Теличенко, В.И. Технология возведении зданий и сооружений: Учеб. пособие для строит. вузов/ В.И. Теличенко, О.М. Терентьев, А.А. Лapidус. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2004. – 446 с., ил.
11. Трофимов, В. И., Каминский, А. М. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 573 с.
12. Трофимович, В. В., Пермьяков, В. А. Проектирование предварительно напряженных вантовых систем. – К.: «Будівельник», 1970. – стр. 140 с., ил.

13. Трущев, А. Г. Пространственные металлические конструкции: Учеб. пособие для вузов. – М: Стройиздат, 1983. – 215 с., ил.
14. Файбишенко, В. К. Металлические конструкции: Учеб. пособие для вузов. – М: Стройиздат, – 1984. – 336 с., ил.
15. Фомина, В.Ф. Архитектурно-конструктивное проектирование общественных зданий: учебное пособие / В.Ф. Фомина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 97 с.

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. История развития вантовых конструкций в зрелищных зданиях и сооружениях	5
1.1. Общие сведения о вантовых конструкциях	5
1.2. Этапы развития зданий с вантовыми конструкциями.....	11
1.2.1. Первые здания с вантовыми конструкциями В.Г. Шухова	11
1.2.2. Развитие зрелищных зданий с вантовыми конструкциями в XX веке..	25
1.2.3. Развитие зрелищных зданий с вантовыми конструкциями в XXI веке.	34
Выводы по главе 1.....	42
Глава 2. Вантовые конструкции в зрелищных и спортивных зрелищных зданиях и сооружениях: архитектурные, объемно-планировочные и конструктивные особенности	44
2.1. Объемно-планировочные и архитектурные особенности спортивных зрелищных зданий	44
2.1.1. Принцип формообразования вантовых покрытий.....	46
2.1.2. Разновидности форм сооружений в плане	47
2.2. Конструктивные особенности спортивных зрелищных зданий.....	64
2.2.1. Конструктивные элементы и детали вантовых покрытий.....	64
Выводы по главе 2.....	73
Библиографический список	75

Елена Юрьевна Агеева
Анна Игоревна Спиридонова

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАНТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЗРЕЛИЩНЫХ ЗДАНИЯХ

Учебное пособие

Редактор
Гришуткина Н.П.

Подписано в печать Формат 60x90 1/8 Бумага газетная. Печать трафаретная.

Уч. Изд.л. 9,7. Усл.печ.л. 10,4. Тираж 100 экз. Заказ №

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет" 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.

Полиграфический центр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65