

Е.Ю.Агеева, В.А. Тишков, А.Е. Филимонова

**КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВИСЯЧИХ ПОКРЫТИЙ В
ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ**



**Нижний Новгород
ННГАСУ
2015**

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Е.Ю. Агеева, В.А. Тишков, А.Е. Филимонова

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВИСЯЧИХ ПОКРЫТИЙ В
ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ

Утверждено редакционно-издательским советом университета в качестве
учебного пособия

Нижний Новгород
ННГАСУ
2015

ББК 38.44
А 23
УДК 624.9

Рецензенты:

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

Агеева, Е. Ю. Конструктивные особенности висячих покрытий в общественных зданиях : учеб. пособие для вузов / Е. Ю. Агеева, В. А. Тишков, А. Е. Филимонова; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т – Н. Новгород : ННГАСУ, 2015. – 87 с . ISBN

В пособии систематизирован материал по истории создания и развития висячих конструкций в общественных зданиях на протяжении XX–XXI веков, выявлены достоинства и недостатки применения висячих конструкций; проанализированы архитектурные и конструктивные особенности общественных зданий с висячими конструкциями; рассмотрены наиболее выдающиеся общественные здания, являющиеся достижениями современной архитектуры.

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

© Агеева Е.Ю., 2015
© Тишков В.А., 2015
© Филимонова А.Е., 2015
© ННГАСУ, 2015

Содержание

1	Висячие покрытия.....	4
1.1	Общие сведения	4
2	Принцип работы висячих покрытий. Стабилизация формы висячих покрытий	6
3	Классификация висячих покрытий	9
3.2	Мембранные покрытия.....	12
3.3	Тросовые фермы.....	16
3.4	Вантовые висячие покрытия. Классификация вантовых покрытий	19
3.4.1	Конструктивные элементы вантовых покрытий.....	34
3.4.2	Первые здания с висячими конструкциями В.Г. Шухова.....	38
4	Формы геометрических поверхностей и конструктивные особенности висячих покрытий зданий и сооружений. Отечественный и зарубежный опыт	50
4.1	Покрытия на круговом плане.....	50
4.2	Покрытия с опиранием по контуру	52
4.3	Цилиндрические висячие покрытия.....	53
4.4	Вогнутые висячие покрытия	58
4.5	Седловидные покрытия	59
4.6	Поверхности вращения.....	66
4.7	Складчатые и волнистые поверхности	71
4.8	Винтообразные поверхности	75
5	Опорные конструкции висячих покрытий	78
	Заключение	84

1 Висячие покрытия

1.1 Общие сведения

Висячие покрытия – легкие, способные создать поверхности любой формы, - находят все большее применение при строительстве крытых стадионов, выставочных павильонов, ангаров, промышленных зданий и ряда других сооружений, где необходимо иметь большие, свободные от промежуточных опор помещения.

Висячие конструкции представляют собой один из наиболее экономичных видов покрытий, благодаря тому, что материал несущих конструкций работает исключительно на растяжение и несущая способность конструкций используется полностью.

Висячие покрытия впервые были предложены и осуществлены в 1896 г. В.Г. Шуховым на Всероссийской художественной и промышленной выставке в Нижнем Новгороде – показательном смотре достижений России в ремесленном производстве и промышленности. В последнее время они получили широкое распространение в строительстве наравне с оболочками и другими большепролетными конструкциями, как для общественных, так и для промышленных зданий.

По сравнению с традиционными покрытиями (фермы, балки, рамы, арки и т.д.) висячие системы имеют ряд преимуществ, а именно:

- возможность перекрывать большие пролеты (до 100 м и более);
- практически полностью реализуется несущая способность вант;
- малый вес покрытия;
- с увеличением перекрываемого пролета удельная масса несущих элементов на единицу площади практически не увеличивается; минимальная строительная высота покрытия обуславливает соответствующее снижение затрат на эксплуатацию сооружения в целом; хорошая транспортабельность конструкций покрытия, так как ванты можно сворачивать в бухты;
- при монтаже покрытия значительно снижается потребность в лесах и подмостях;

- при эксплуатации висячие покрытия менее чувствительны к различного рода перегрузкам, осадкам опор и прочее.

Вместе с тем покрытиям висячего типа присущи и недостатки, главным из которых является их повышенная деформативность за счет изменения первоначальной геометрической длины вант. Наличие этого свойства может привести к нарушению герметичности кровли, ограничить возможность установки подвесного кранового оборудования, а также негативно отразиться на аэродинамической устойчивости покрытия и, как следствие, привести к дополнительным затратам на ее повышение. Еще одним существенным недостатком является необходимость применения специальных опорных конструкций, воспринимающих усилия распора.

2 Принцип работы висячих покрытий. Стабилизация формы висячих покрытий

Все висячие покрытия - распорные конструкции, причем распор тем больше, чем отношение стрелы провисания f к пролету L меньше. Обычно относительное провисание висячих покрытий f/L принимается в границах от $1/10$ до $1/20$.

Распор от висячих конструкций передается либо на опорный контур, который им воспринимается, либо в грунт через стойки и оттяжки, заанкеренные в землю или заделанные в массивные части здания [13].

Основные несущие элементы висячих покрытий – *ванты* (тросы, канаты, гибкие стержни, пучки высокопрочной проволоки, ленты и т.п.), работают на растяжение. Пролетные несущие конструкции висячих покрытий так же работают в основном на растяжение. В них в отличие от большинства других типов конструкций покрытий не возникают изгибающие моменты. Они являются как бы конструктивной разновидностью оболочек, но отличаются от них тем, что оболочки сжаты и выпуклы, а пролетные несущие конструкции висячих покрытий растянуты и вогнуты, хотя бы в одном направлении[11].

Элементы несущей пролетной конструкции висячих покрытий имеют, как правило, незначительную изгибную жесткость[5]. Поэтому форма покрытия в значительной степени (если не приняты специальные меры) зависит от характера внешней нагрузки. Существенные изменения формы висячего покрытия могут вызвать расстройство кровли или разрушение ограждающей конструкции и сделать, таким образом, здание непригодным к эксплуатации. В легких и гибких висячих покрытиях при воздействии динамических (обычно ветровых) нагрузок могут возникнуть колебания, представляющие большую опасность для пролетной и особенно для опорной конструкции. Поэтому вопрос придания необходимой жесткости висячим покрытиям является очень важным.

Можно отметить следующие основные опасности, связанные с недостаточной жесткостью покрытия:

- 1) резкое изменение формы поверхности всячего покрытия (вывертывание, хлопок) под действием отрицательной ветровой нагрузки;
- 2) колебания, возникающие в покрытии при воздействии ветра;
- 3) недопустимое изменение первоначальной формы покрытия при неравномерной нагрузке;
- 4) возникновение трещин в ограждающей конструкции покрытия и расстройство кровли.

Для снижения деформативности покрытий всячих конструкций производят их стабилизацию. Существует несколько способов стабилизации покрытия:

- стабилизация пригрузкой. Стабилизация пригрузкой осуществляется грузами, жестко с собой не связанными (например, сборными железобетонными плитами);
- стабилизация 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 с помощью стабилизирующих тросов (вант). При этом способе наряду с несущим тросом используется стабилизирующий (натяжной) трос, который связан с несущим системой жестких распорок, гибких подвесок или одновременно распорок и подвесок или гибких раскосов. Напрягающий трос может располагаться ниже или выше несущего;
- применение перекрестных систем путем самонапряжения тросов. 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 уменьшения деформативности покрытия и распределения сосредоточенных и неравномерных нагрузок на несколько несущих вант;
- применение висячих ферм и балок, представляющих собой *жесткие ванты*. Они служат для стабилизации покрытий с легкой кровлей.

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

3 Классификация висячих покрытий

Висячими называются строительные конструкции, в которых основные несущие элементы, перекрывающие пролет сооружения, испытывают растягивающие усилия, т.е. работают на растяжение.

На рисунке 1 представлена классификация висячих покрытий.

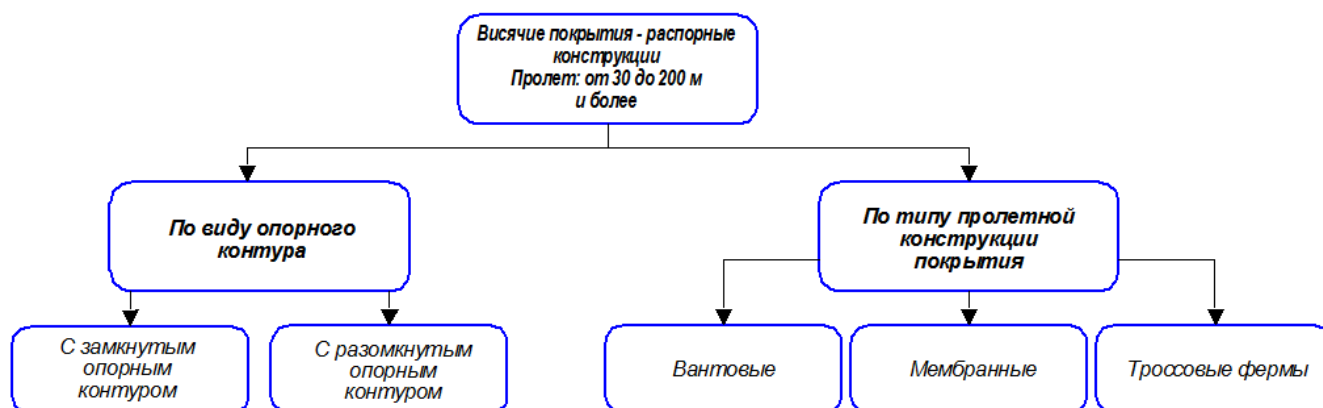


Рис. 1. Классификация висячих покрытий

Висячие конструкции подразделяются на две большие группы: с замкнутым опорным контуром и разомкнутым опорным контуром (рис. 2, а, б). В этой классификации подчеркивается связь конструктивных особенностей с архитектурно-планировочным решением сооружения.

К первой группе отнесены конструкции, опорный контур которых является замкнутым, жестким и не передает горизонтальные усилия на нижележащие конструкции (стены и колонны). Сюда входят разновидности покрытий круглых, эллиптических и овальных в плане, в опорном контуре которых, обычно в железобетонном кольце, при осесимметричной нагрузке возникают в основном сжимающие усилия. В первой группе можно выделить два вида конструкций: с замкнутым опорным наружным контуром без внутренних опор (разрезы 1-1, 2-2 на рис. 2, а) и с таким же контуром, но с внутренними опорами (разрез 3-3 на рис. 2, а).

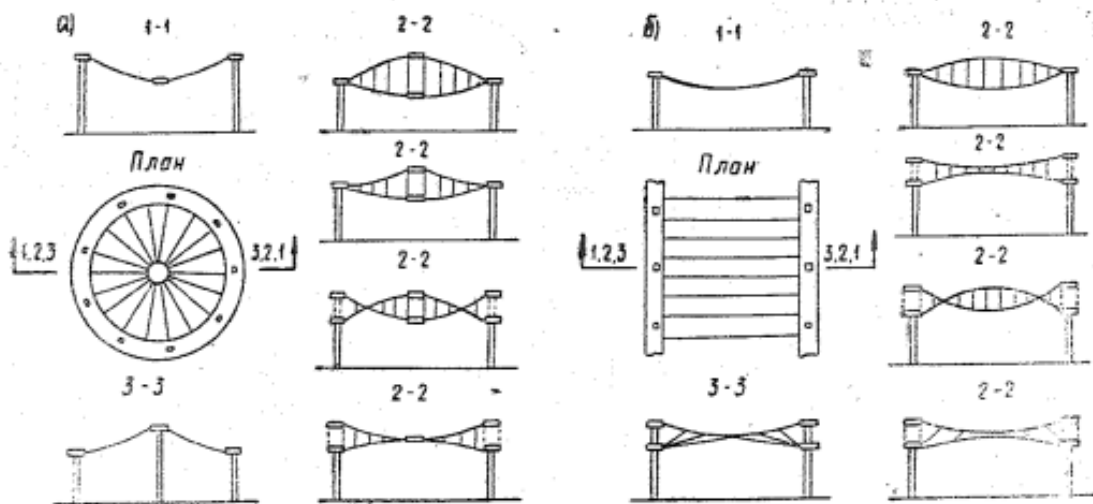


Рис. 2. Схемы висячих покрытий

а – с замкнутым контуром, б – с разомкнутым контуром

Ко второй группе отнесены конструкции с разомкнутым контуром, у которых распор воспринимается либо нижележащими конструкциями, либо анкерными устройствами, заглубленными в землю. Наиболее распространенный тип зданий с подобными покрытиями – прямоугольное с расположенными снаружи оттяжками или контрфорсами. Вторая группа тоже делится на два вида: однопролетные с разомкнутым контуром и многопролетные с разомкнутым контуром.

В многопролетных покрытиях в отличие от однопролетных, удается снизить относительный расход материалов, идущих на оттяжки и анкерные устройства[2].

По виду расположения основных растянутых элементов все висячие покрытия в этой классификации можно разбить на три типа:

- 1) мембраны (рис. 3);
- 2) тросовые фермы (рис. 4, а, б);
- 3) вантовые покрытия (рис. 5, а, б).

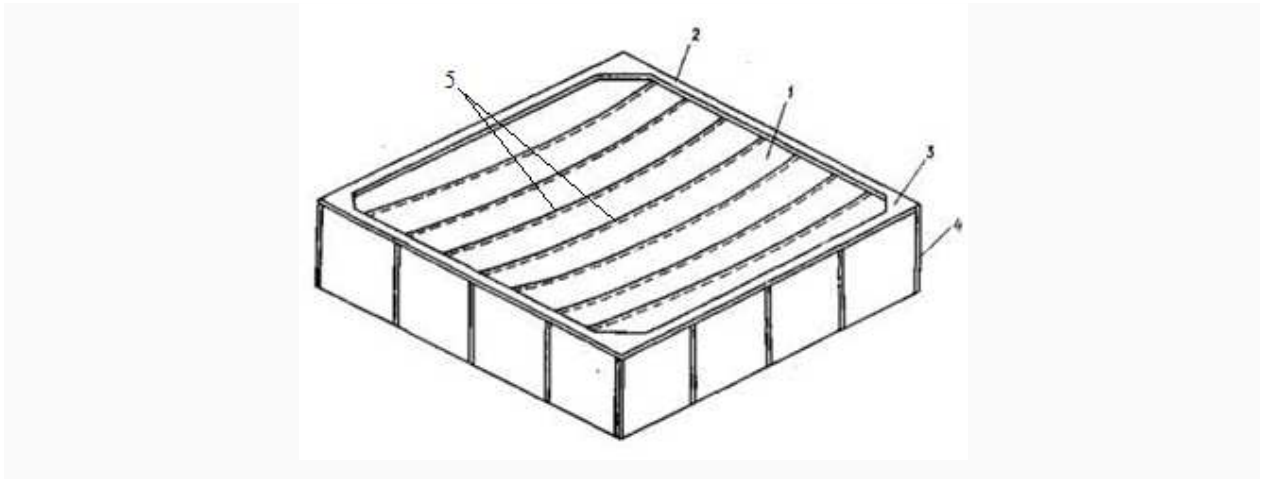


Рис. 3. Схема мембранного покрытия

1 - мембрана; 2 - опорный контур; 3 – вуты (утолщения плит или балок в железобетонных конструкциях, повышающие сопротивление изгибающим нагрузкам); 4 – стойки; 5 – швы соединения листов (стыки)

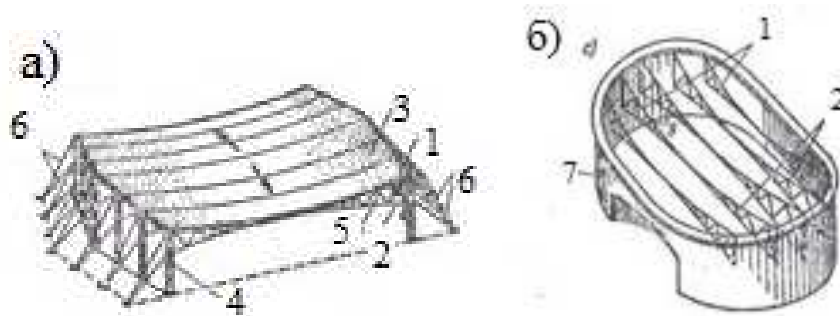


Рис. 4. Покрытия с параллельно расположенными тросовыми фермами системы инженера Д. Яверта:

а – тросовые фермы, опертые на колонны с оттяжками; б – тросовые фермы, заделанные в овальные стенки; в – системы вант и балок

1 – несущие тросы; 2 – предварительно напряженные стабилизирующие тросы; 3 – кровля; 4 – стойки опоры; 5 – тросовая ферма; 6 – оттяжка; 7 – овальная стенка

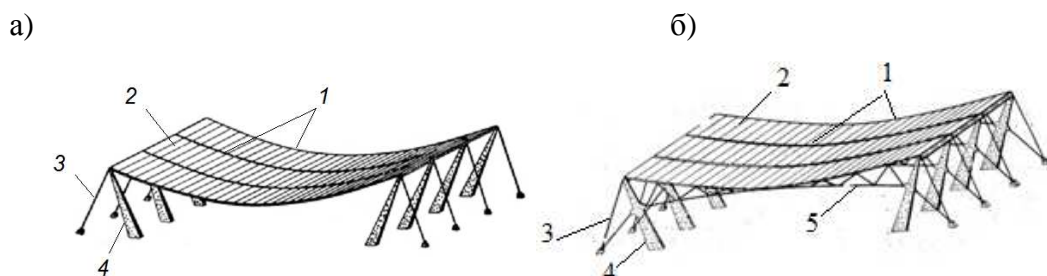


Рис. 5. Вантовые покрытия:

а - однопоясные вантовые покрытия; б – двухпоясные вантовые покрытия

1 – несущие ванты; 2 – элементы покрытия (кровля); 3 – оттяжки; 4 – опоры (стойки); 5 - стабилизирующие ванты

3.2 Мембранные покрытия

Висячие покрытия в виде мембран образуются из стальных или алюминиевых листов, искусственных пленок и специальных тканей. В мембранных покрытиях тонкий лист соединяет в себе функции как несущей, так и ограждающей конструкций – это основное достоинство таких покрытий. Также достоинство мембранных покрытий – высокая технологичность их изготовления и монтажа. Как правило, мембрану укрупняют на заводе в крупногабаритные полотнища шириной 6 - 12 м, их сворачивают в компактные рулоны для транспортирования на стройплощадку, а при устройстве покрытия раскатывают рулоны. Особенность мембраны состоит в том, что в покрытии они работают только на двухосное растяжение, что позволяет перекрывать 200-метровые пролеты стальной мембраной толщиной 4-6 мм.

Одна из главных задач, с которой встречается конструктор при проектировании мембранных покрытий из листового металла, – это задача соединения между собой отдельных листов, которые изготавливаются обычно ограниченной ширины. Наилучшим способом соединения считается сварка. Для тонких листов возможно соединение на клеях. В цилиндрической мембранной конструкции швы, расположенные вдоль линии провисания (рис.2), при равномерной нагрузке на покрытие не работают. Для соединений, в которых важно обеспечить только водонепроницаемость, можно устроить стык по типу, показанному на рисунке 6.

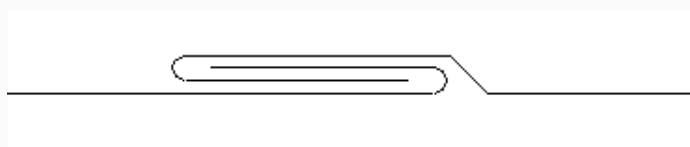


Рис. 6. Нерабочий стык листов в цилиндрической мембране

Менее пригодны соединения на заклепках. Для уменьшения деформативности мембран при несимметричном нагружении иногда устраивают ребра жесткости, например, висячие металлические профили (рис. 11)

Формы мембранных висячих покрытий весьма разнообразны. Кроме цилиндрических широко распространены мембраны, образующие поверхности вращения. Примером могут служить грибовидные павильоны на выставке цветов (рис. 7).

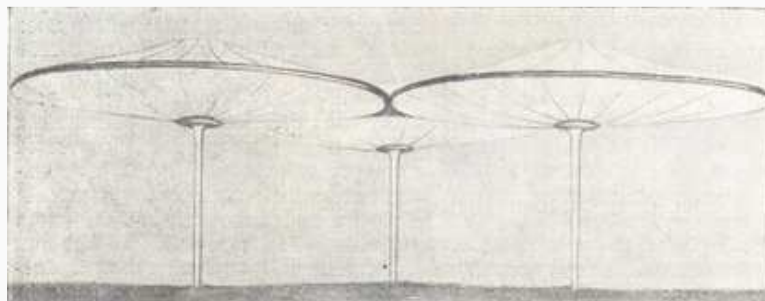


Рис. 7. Грибовидные павильоны на выставке цветов 1955 г. в Касселе

На рис. 8 приведена схема конструкции французского выставочного павильона в Загребе, построенного в 1937 г. и перекрытого висячим покрытием в виде усеченного конуса с уклоном к центру павильона. Стальная мембрана прикреплена к двум круглым кольцам. Внешнее кольцо коробчатого сечения имеет диаметр 30 м и опирается на 20 металлических трубчатых стоек высотой 15 м. На внутреннее кольцо, имеющее V-образное сечение, опирается фонарь. Вода, стекающая с покрытия во внутреннее кольцо, отводится затем по трем желобам шириной 1 м, подвешенным к покрытию[11].

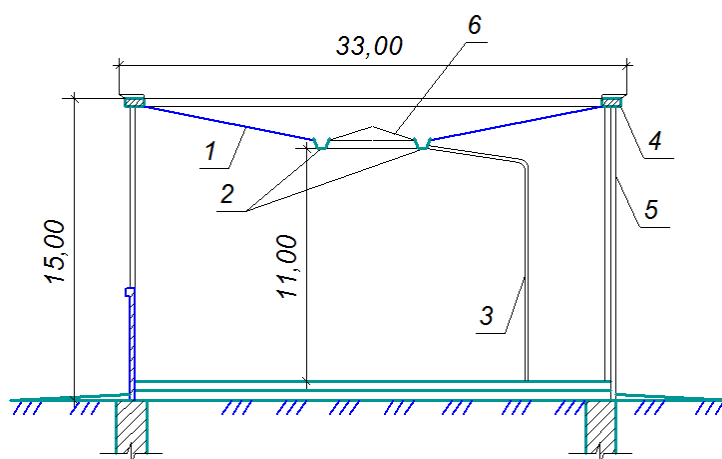


Рис. 8. Конструктивная схема французского выставочного павильона в Загребе

1 - мембрана; 2 – внутреннее опорное кольцо (желоб); 3 – водоотводная труба; 4 – сжатое кольцо коробчатого сечения; 5 – полая стальная стойка; 6 – фонарь

Наиболее жесткими мембранными покрытиями являются предварительно напряженные покрытия двойкой кривизны (рис. 9).

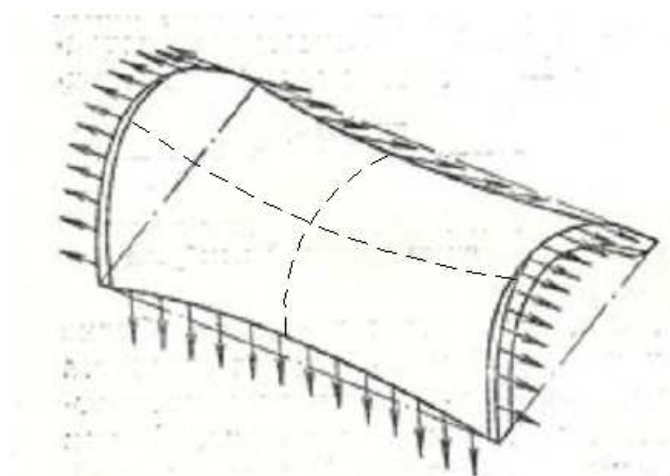


Рис. 9. Схема предварительно напряженного висячего покрытия двойкой кривизны

В продольном рабочем направлении такая мембрана имеет вогнутое очертание, а в поперечном направлении, где действуют силы предварительного напряжения, мембрана выпукла. В связи с их большой жесткостью предварительно напряженные мембраны двойкой кривизны могут применяться в открытых навесах (рис. 10).

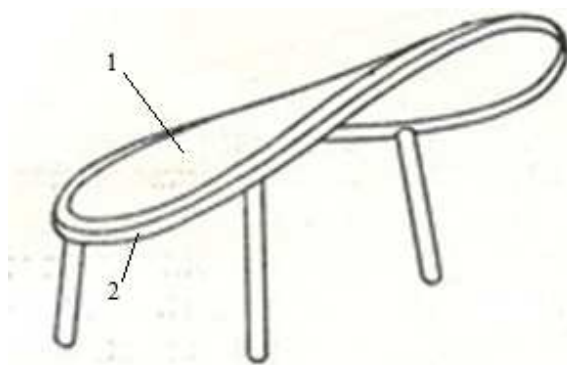


Рис. 10. Навес с мембранным висячим покрытием двойкой кривизны, натянутым на пространственный криволинейный опорный контур;
1 – мембрана; 2 – опорный контур

Мембраны с достаточным предварительным напряжением при изменении нагрузки не меняют своей формы, но под действием ветра в них могут возникнуть опасные колебания. Это относится прежде всего к пологим мембранам, собственный вес которых значительно меньше ветрового давления.

Мембранное покрытие было использовано в покрытии универсального спортивного зала в Ленинграде, разработанного научно-исследовательским проектным институтом ЛенЗНИИЭП, которое перекрывает круглое в плане сооружение пролетом 160 м. Конструкция этого мембранного покрытия представляет собой металлические листы толщиной 6 мм, уложенные на радиально расположенные висячие стальные элементы таврового сечения. Стабилизация этого покрытия выполнена частично предварительно напряженными тросовыми фермами, натягивающими мембрану в зоне, примыкающей к опорному кольцу, а частично — специальной технической площадкой с инсталляциями, пригружающей центральную часть покрытия (рис.11) [13].

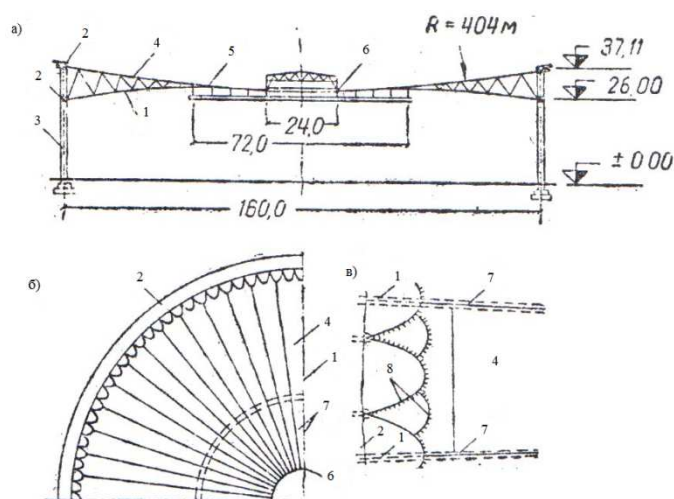


Рис. 11. Мембранные покрытия

а - поперечный разрез мембранного покрытия над универсальным спортивным залом в Ленинграде, б – схема положения в плане стальных листов мембраны, опирающихся по краям на висячие элементы таврового сечения, в – детали крепления стальных листов к опорному кольцу

1 – предварительно напряженные стабилизирующие тросы, 2 – жесткий опорный контур, 3 – стойки, 4 – мембрана из стального листа толщиной 6 мм, 5 – пригрузка центра покрытия технической площадкой, 6 – внутреннее растянутое кольцо, 7 – висячие двутавровые профили, к которым крепятся листы мембраны, 8 – сварные швы

3.3 Тросовые фермы

В основном тросовые фермы используются для прямоугольных покрытий (рис. 12), в которых фермы работают как независимые плоские системы, хотя ничто не препятствует применению этих ферм в круглых покрытиях (рис. 13).

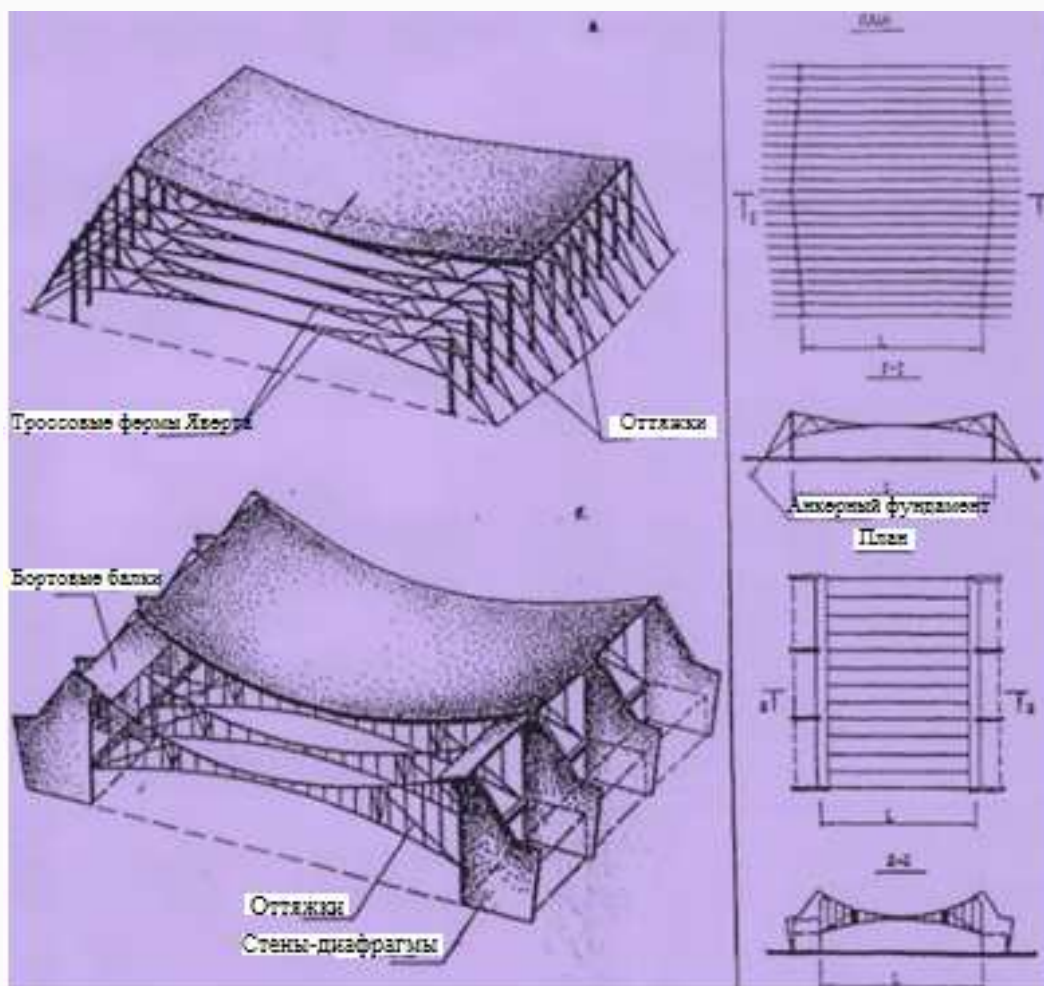


Рис. 12. Тросовые фермы на прямоугольном плане

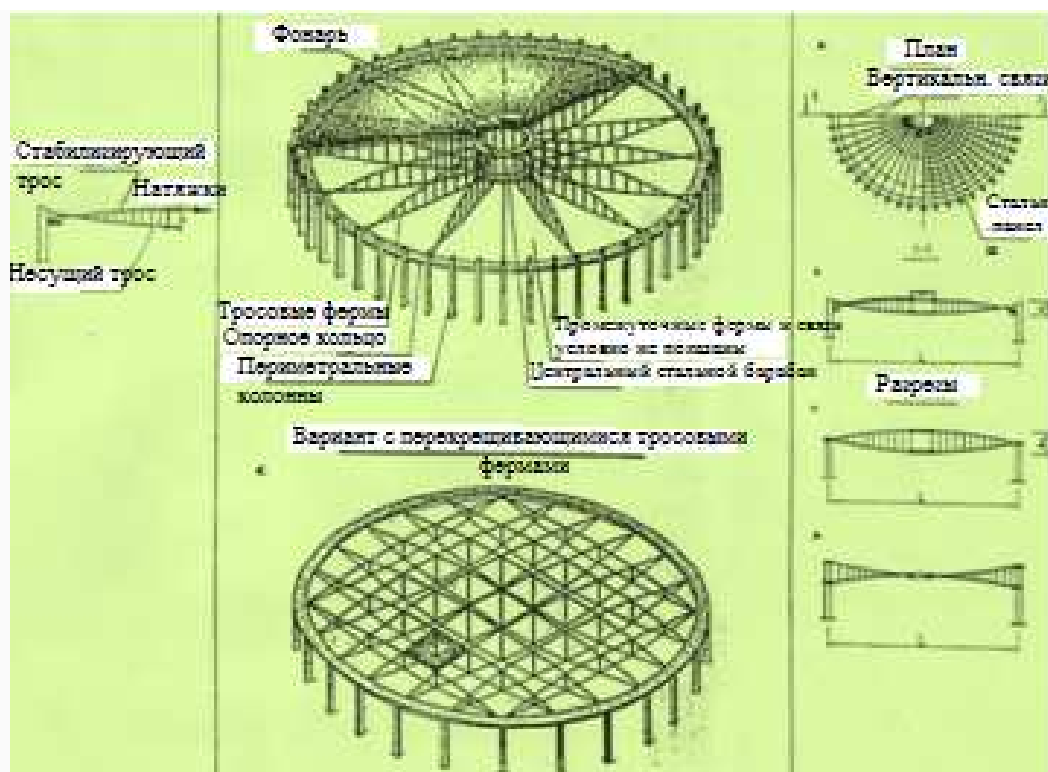


Рис.13. Тросовые фермы на круглом плане

Тросовые фермы наиболее целесообразны в покрытиях, где возможны большие неравномерные нагрузки, и в многопролетных покрытиях, так как благодаря геометрической неизменяемости они имеют большую жесткость, чем двухпоясные системы. Фермы в покрытии обычно располагают параллельно на расстоянии 3 - 6 м одна от другой, что определяется несущей способностью настила. В качестве настила по фермам чаще всего укладывают легкие кровельные щиты с утеплителем и гидроизоляцией. Атмосферную воду с кровли отводят по продольному желобу, расположенному в середине покрытия. Продольный уклон желоба создают путем расположения ферм на разной высоте по длине здания. При многопролетном решении покрытия промежуточные опоры ферм целесообразно устраивать в виде балок, ферм или рам, воспринимающих только вертикальные нагрузки от покрытия.

По внешнему очертанию тросовые фермы сильно отличаются от обыкновенных ферм из жестких профилей и больше соответствуют очертанию двухпоясных систем, так как их пояса должны быть

приспособлены к работе элементов ферм только на растяжение. Стрелки провеса поясов благодаря отсутствию кинематических перемещений несколько больше, чем в двухпоясных системах.

Система решетки в тросовых фермах принимается обычно треугольной без дополнительных стоек и подвесок. В качестве элементов решетки применяются предварительно напряженные гибкие стержни[12].

Панели ферм часто принимают большей ширины, чем ширина кровельной панели, и тогда элементы кровли опираются непосредственно на верхние пояса, заставляя их работать дополнительно на местную нагрузку как струну, испытывающую поперечное нагружение.

Основные параметры решетки фермы - панели и углы наклона раскосов - влияют на величину предварительного напряжения фермы, так как благодаря ему во всех элементах фермы создаются растягивающие усилия, которые должны превышать сжатие, появляющееся в этих элементах от внешней, нагрузки.

Чем меньше усилия сжатия, тем меньше может быть предварительное напряжение, что выгодно, так как при этом уменьшаются усилия в растянутых внешней нагрузкой элементах. Таким образом, выбор схемы и параметров решетки в тросовой ферме представляет собой вариантную задачу.

Тросовые фермы рассчитывают общепринятыми методами строительной механики, применяемыми при расчете статически неопределимых стержневых систем.

Ферму рассчитывают на внешние нагрузки и единичные усилия предварительного напряжения. Усилия от предварительного напряжения во всех элементах фермы должны быть растягивающими, что достигается соответствующим подбором геометрии системы. Сравнением сжимающих усилий в стержнях фермы с усилиями от единичного натяжения определяют минимальное натяжение, которое погашает сжимающие усилия от внешней

нагрузки во всех стержнях, после чего составляются результирующие таблицы усилий. В некоторых стержнях усилия от временной нагрузки и предварительного натяжения будут суммироваться и, следовательно, предварительное напряжение будет увеличивать их сечение. В отдельных случаях, при больших неравномерных нагрузках, допускают выключение из работы некоторых раскосов и превращение системы в этом месте в геометрически изменяемую. Этот прием можно применять только при условии выполнения всей системой нормы допустимого прогиба, но зато он дает возможность уменьшить предварительное напряжение фермы.

На действие временной нагрузки рассматривают как симметричное, так и несимметричное нагружения. Усилие предварительного напряжения следует принимать с коэффициентом перегрузки или недогрузки, смотря по тому, что увеличивает расчетное усилие. Предварительное напряжение тросовых ферм удобно осуществлять натяжением раскосов винтовыми стяжками, которыми раскосы с одной стороны присоединены к узлам фермы.

3.4 Вантовые висячие покрытия. Классификация вантовых покрытий

Вантовые висячие покрытия являются наиболее распространенным типом висячих покрытий. Они образуются сеткой растянутых вант, на которую укладываются или подвешиваются к ней элементы ограждения.

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

В этом случае в отличие от покрытий в виде мембран элементы ограждения воспринимают только местные нагрузки на покрытие и не участвуют в статической работе сооружения в целом.

К достоинствам покрытий по сеткам из вант нужно, прежде всего, отнести малый собственный вес конструкции, простоту и короткие сроки ее возведения, а также возможность регулирования усилий в вантах.

Вантовые конструкции можно классифицировать по разным признакам, но поскольку на формирование объемно-пространственной структуры зданий, образованных вантовыми конструкциями, совместно влияют конструктивная форма покрытия и опорного контура, целесообразно выполнять классификацию именно по особенностям этих конструктивных элементов. Также, как уже отмечалось выше, одним из основных недостатков вантовых систем как разновидности висячих покрытий, является повышенная деформативность. Именно поэтому очень важным является проведение необходимых действий по устранению подвижности и деформативности.

Классификация вантовых конструкций представлена на рисунке 14.

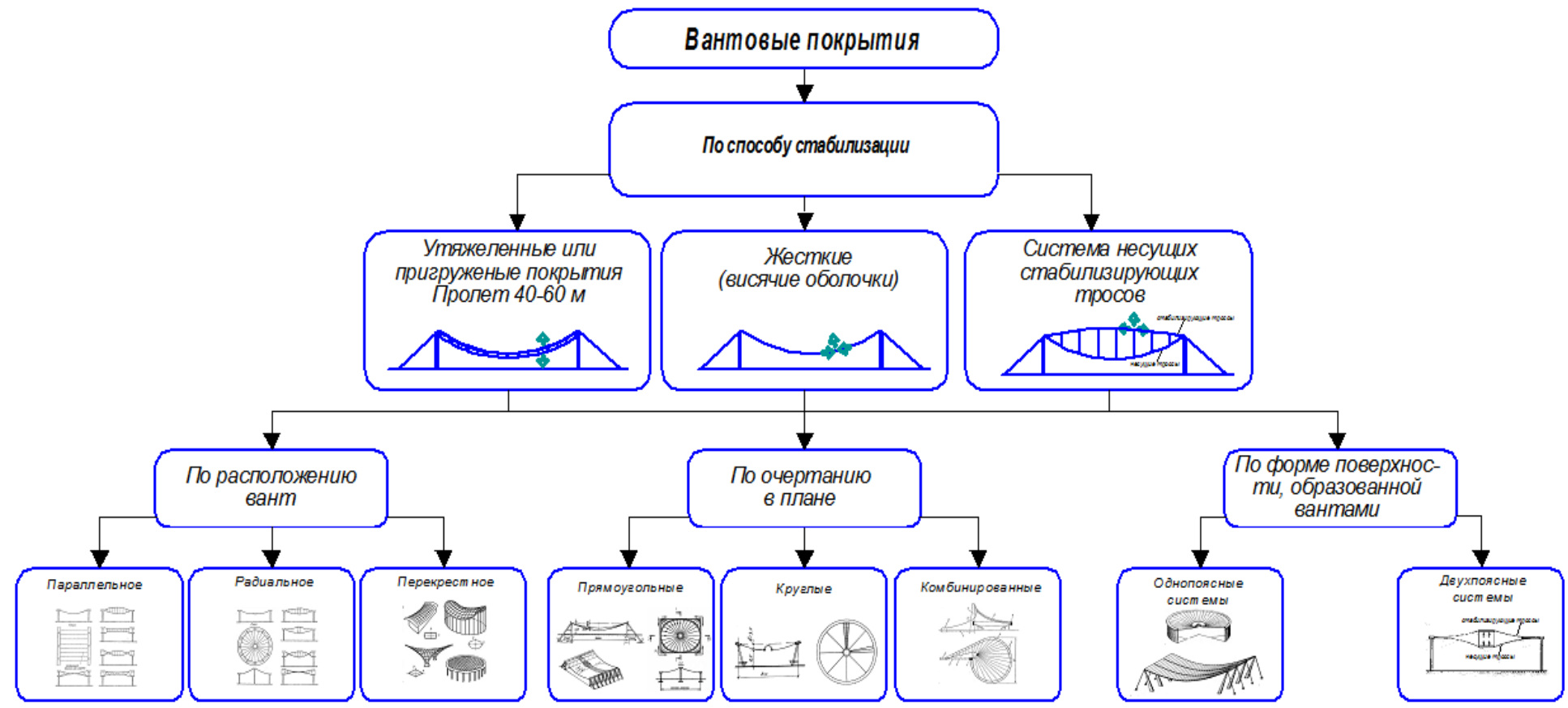


Рис. 14. Классификация вантовых покрытий

По способу стабилизации

Для обеспечения достаточной жесткости вантовых покрытий и устранения их деформативности применяют преимущественно три способа:

а) увеличение собственного веса покрытий (создание пригруженных покрытий) и действующих на покрытие постоянных нагрузок (вентиляционных фонарей, подвесных потолков и т.п.);

б) временный пригруз покрытий с последующим омоноличиванием швов между оболочками настила, что превращает покрытие в жесткую оболочку;

в) предварительное натяжение несущих тросов при помощи стабилизирующих тросов, расположенных параллельно несущим или под некоторым углом.

Утяжеленные или пригруженные покрытия состоят из тросов и железобетонных плит, уложенных или непосредственно на тросы, или на железобетонные балки, которые крепятся сверху к тросам. Пригруженные покрытия должны быть обязательно защищены в поперечном направлении от раскачивания, что осуществляется жестким контуром на колоннах или стеной с контрфорсами, в которые упираются концы поперечных балок. Утяжеление покрытия не может полностью устранить некоторую его подвижность при односторонних нагрузках, однако эта подвижность тем меньше, чем больше отношение собственного веса к односторонней — временной нагрузке. Существенный недостаток пригруженного покрытия — значительный собственный вес, который увеличивает расход материала на тросы, опорный контур, несущие колонны, стенки и фундаменты; поэтому такие покрытия устраивают над сравнительно небольшими пролетами порядка 30 - 40 м. Преимущество пригруженного покрытия состоит в простоте его монтажа [13].

Висячие оболочки отличаются от пригруженных покрытий тем, что железобетонные плиты покрытия, уложенные на свободно подвешенные тросы, замоноличиваются под временной пригрузкой. После затвердения

швов - между плитами и снятия пригрузки тросы, стремясь вернуться в исходное положение, обжимают покрытие, создавая жесткую предварительно напряженную оболочку, выгнутую книзу.

Висячие оболочки могут быть построены на базе параллельных тросов или на тросах, подвешенных радиально с заделкой их в круглый опорный контур. В последнем случае водоотвод приходится организовать через помещение, находящееся под покрытием.

На рисунке 15а приведен пример такого покрытия, а на рисунке 15б - пример покрытия, в котором стабилизация достигается натяжением специальных тросов.

Способ предварительного напряжения с помощью стабилизирующих тросов более характерен для вантовых покрытий, но его применение сопряжено с некоторыми трудностями изготовления и монтажа.

Стабилизирующие тросы, оттягивая несущие тросы книзу, тем самым существенно уменьшают их вертикальные перемещения при изменении величины и положения нагрузок. Кроме того, стабилизирующие тросы воспринимают силы ветрового отсоса и передают их так же, как и силы предварительного натяжения, на опорный контур или соответственно на стойки с оттяжками.

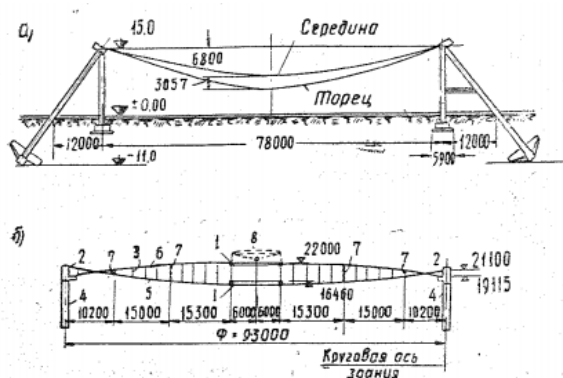


Рис. 15. Вантовые покрытия

а – конструктивная схема покрытия гаража в Красноярске, б – то же Дворца спорта

«Юбилейный» в Ленинграде:

- 1 – внутреннее опорное кольцо, 2 – наружное опорное кольцо, 3 – распорки, 4 – колонны,
5 – несущий трос, 6 – стабилизирующий трос, 7 – связи, 8 – фонарь

По расположению вант

По расположению вант, вантовые покрытия подразделяются на:

- вантовые покрытия с параллельным расположением;
- с радиальным расположением;
- с перекрестным расположением вант.

Покрытия с параллельным расположением вант

Покрытия с параллельно расположенными вантами наиболее просты в конструктивном исполнении и их применяют для прямоугольных в плане зданий (рис. 16). По типу кровли они могут быть сборные и монолитные, однопролетные и многопролетные. Монолитные по сравнению со сборными обладают большей сопротивляемостью образованию трещин, но не отвечают требованиям индустриализации строительства. Конструкция покрытия представляет собой систему параллельных вант, закрепленных на незамкнутом контуре, роль которого может выполнять железобетонная или стальная балка, либо каркас пристройки. Шаг вант t рекомендуется принимать равным 1,5 - 2,0 м, а стрелу провисания f назначают в пределах $1/10 - 1/25$ от L (L – перекрываемый пролет). При наличии требований по ограничению объема здания, а следовательно, и покрытия, можно назначать меньшее значение стрелы провисания. Однако в этом случае усилия в вантах и опорных конструкциях возрастают, что приводит к увеличению расхода материалов. Опорные элементы (балки), воспринимающие распор от вант, могут иметь прямоугольное, двутавровое или другое сечение. Ширину сечения b и высоту h в зависимости от шага колонн d ориентировочно можно принять равными $d/10$ и $d/15$ соответственно.

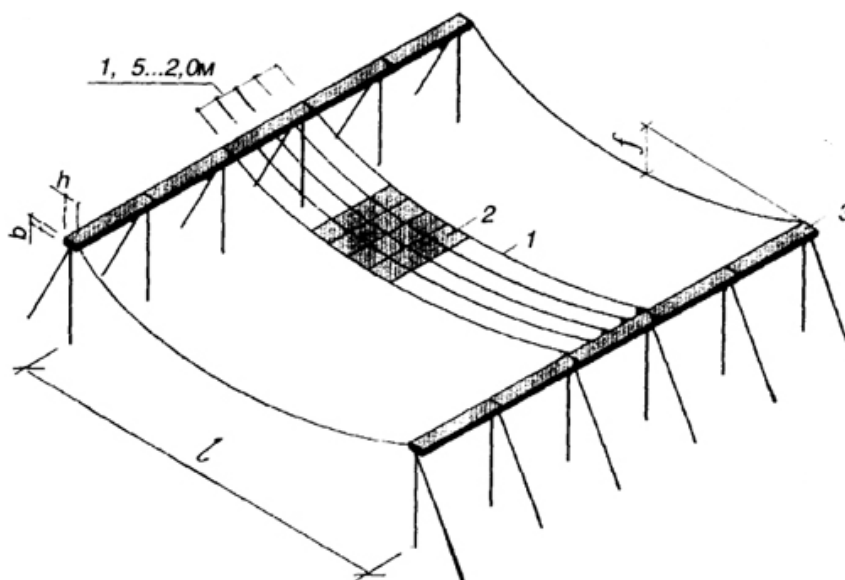


Рис. 16. Схемы покрытий с параллельными вантами:

1 - несущие нити (ванты); 2 - плиты кровли; 3 - балки опорного контура

Покрытия с радиальным расположением вант

Системы с радиальными нитями применяют в зданиях круглых, реже эллиптических в плане. Для крепления нитей предусматривают наружное и внутреннее опорные кольца. По нитям, расположенным по радиусам на одинаковых расстояниях, укладывают трапециевидные железобетонные плиты, в дальнейшем замоноличиваемые. Расстояния между нитями по периметру покрытия определяют на основе вариантного проектирования и принимают его кратным шагу колонн, поддерживающих покрытие. По конструктивной форме покрытия с радиальными нитями делят на вогнутые (рис. 17, а) и шатровые (рис. 17, б).

В вогнутых покрытиях распор от нитей воспринимается кольцами, поэтому покрытие в целом является самоуравновешенной системой и на колонны передаются лишь вертикальные усилия от веса покрытия. Наружное кольцо в круглых зданиях при загрузке всего покрытия равномерной нагрузкой работает только на сжатие и его рационально делать из железобетона. В эллиптических зданиях в кольце возникает изгиб; это существенно повышает его материалоемкость, что в сочетании с увеличением типоразмеров плит покрытия ограничивает применение таких

зданий. Внутреннее кольцо работает на растяжение, его обычно выполняют из стали. Диаметр внутреннего кольца назначают из условия размещения конструкций крепления нитей. При наличии фонаря размер внутреннего кольца может быть увеличен в соответствии со светотехническими и (или) аэрационными требованиями. Возможно устройство покрытия без внутреннего кольца, что достигается попарным расположением нитей вдоль хорд, равноудаленных от центра покрытия.

Недостатком вогнутых покрытий является трудность отведения атмосферных вод. Внутренний водоотвод через трубу, идущую от центра покрытия к наружным стенам, помимо конструктивных неудобств, загромождает внутреннее пространство и ухудшает интерьер. При наружном водоотводе нужно располагать покрытие наклонно или применять специальные надстройки с покатой крышей, с которой вода стекает к периметру здания. Эти надстройки иногда используют для вспомогательных помещений.

В шатровом покрытии внутреннее кольцо воспринимает не только горизонтальные силы от распора в нитях, но и передает на среднюю стойку всю или значительную часть вертикальной нагрузки от покрытия, а иногда превышающую ее. Кольцо обычно опирают на центральную железобетонную опору в виде толстостенной трубы большого диаметра или на куст стоек, связанных по высоте ригелями.

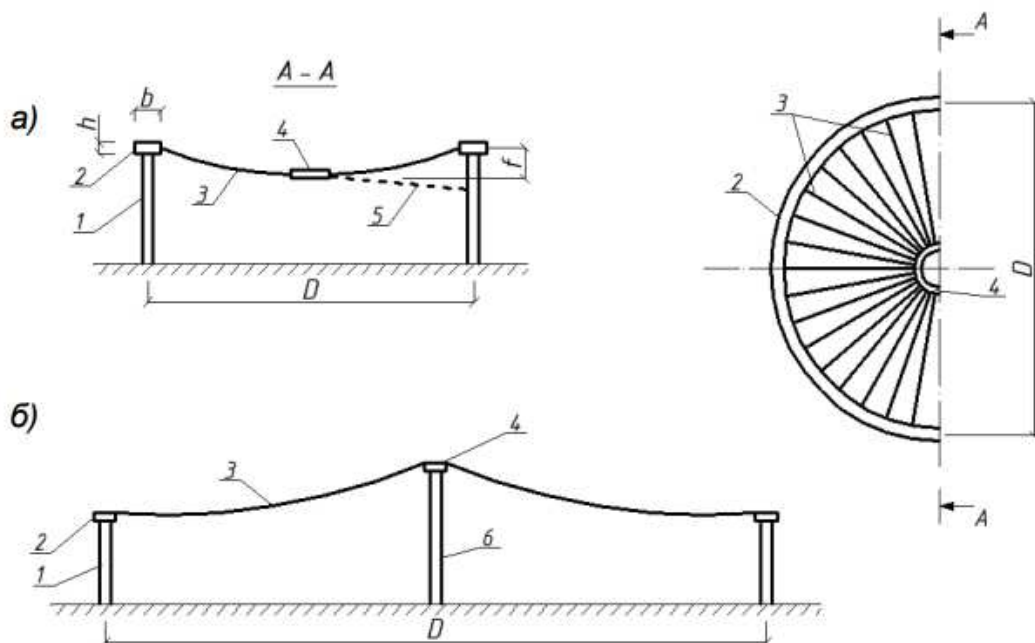


Рис. 17. Схемы висячих оболочек с радиальными вантами: вогнутое (а) и шатровое (б) покрытия; 1 – колонны, 2 – наружное опорное кольцо, 3 – ванты, 4 – центральное кольцо, 5 – водоотводящая труба, 6 – центральная стойка в виде колонны

Покрывтия с перекрестным расположением вант

Такие покрытия образуются двумя взаимно ортогональными семействами параллельных тросов (несущих и стабилизирующих); поверхность покрытия при этом имеет седловидную форму.

Применение перекрестных систем дает архитекторам возможность создавать весьма разнообразные формы вантовых покрытий.

Для перекрестных вантовых систем оптимальная величина стрелы подъема стабилизирующих тросов составляет $1/12 - 1/15$ пролета, а стрелы провеса несущих тросов $1/25 - 1/75$ пролета.

Перекрестные вантовые системы сочетаются с легкими кровельными покрытиями, в качестве которого часто применяют сборные плиты из легкого бетона или армоцемента.

Ввиду малого собственного веса покрытий из тросовых сеток существенное значение приобретает ветровая нагрузка. Существует опасность появления флаттера (динамической неустойчивости) таких покрытий, особенно при малой кривизне.

Конструкции этого типа характеризуются повышенной чувствительностью к температурным воздействиям. Для них опасны также динамические нагрузки, особенно при больших пролетах.

Перекрестная система расположения вант наиболее часто применяется при эллиптическом или овальном плане помещения.

В системах отрицательной гауссовой кривизны (рис. 18) и в двухъярусных системах тросов различают несущие и стабилизирующие ванты. Несущие ванты обращены выпуклостью вниз и несут всю нагрузку от покрытия. Стабилизирующие ванты ограничивают перемещения несущих тросов и обращены выпуклостями вверх. Стрела провеса вант при полной расчетной нагрузке назначается в пределах $1/15-1/30$ их пролета с учетом архитектурных, конструктивных и технико-экономических соображений. Расстояние между вантами и размеры плит назначаются с учетом необходимости снижения веса оболочки, сокращения сроков строительства, шага контурных опор, членения сборных элементов контура, а также размещения сосредоточенных нагрузок, которые целесообразно передавать в узлы пересечения вант.

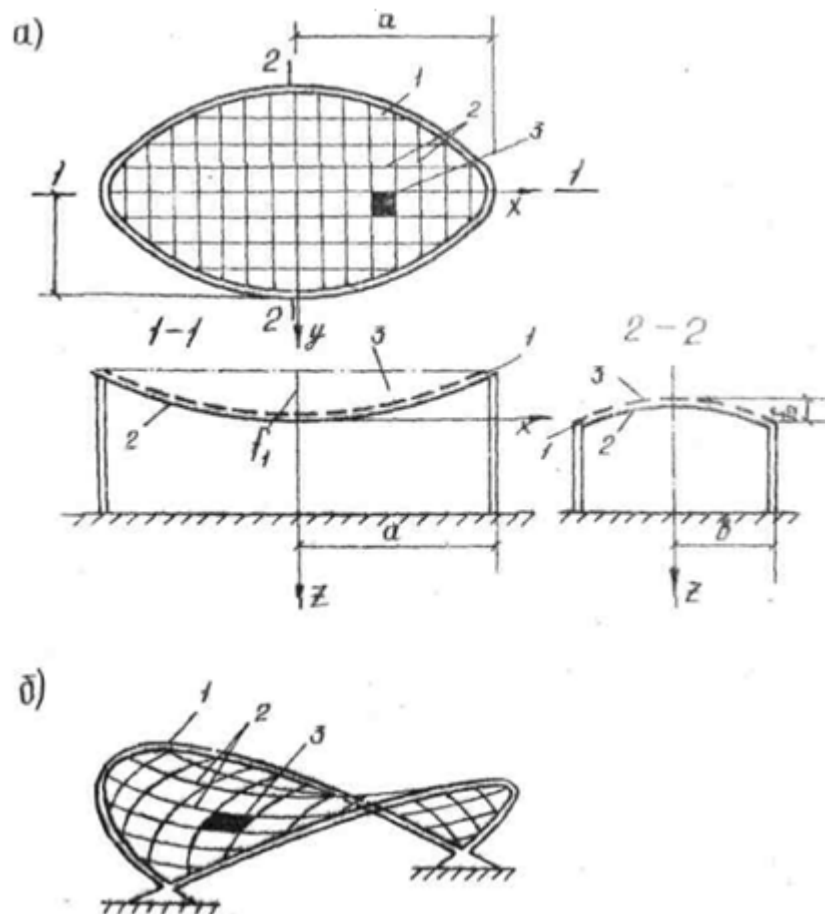


Рис. 18. Схемы вантовых покрытий с перекрестным расположением вант:

а – по форме гиперболического параболоида с замкнутым контурным кольцом, опертым по контуру; б – то же с контурными наклонными арками, опертыми в двух точках;

1 – опорное кольцо, 2 – ванты, 3 – плиты, 4 – арки

По очертанию в плане

По очертанию в плане вантовые покрытия делятся на:

- прямоугольные;
- круглые;
- комбинированные.

Прямоугольный план здания

Для устройства вантовых покрытий с прямоугольным планом применяются системы из параллельных вант или вантовых ферм (рис. 19).

В системах с прямоугольным планом непосредственное закрепление вант к элементам контура приводит к возникновению очень больших изгибающих моментов. Контур становится очень тяжелым, что резко снижает эффективность конструкции. Устройство системы подкосов,

контрфорсов, оттяжек с анкерами, в целях передачи усилий распора на фундаменты, также приводит к большому расходу материалов и усложняет конструкцию. Поэтому висячие покрытия на прямоугольном плане по приведенным схемам, обладающие рядом преимуществ, большого распространения не получили.

В последнее время появился ряд предложений (Р.Н. Мацелинский и др.) по облегчению прямоугольных контуров. Суть этих предложений состоит в том, чтобы передать усилия от вантов на углы контура (рис. 20) и тем самым снизить величину изгибающих моментов. С целью снижения изгибающих моментов в покрытиях прямоугольного плана рекомендуется вначале уложить плиты, смежные с опорным контуром, соединить их с контуром, с вантами и между собой. На этой стадии монтажа контур и приконтурные плиты (рис. 21) образуют жесткую замкнутую раму, которая воспринимает изгибающие моменты от последующих нагрузок.

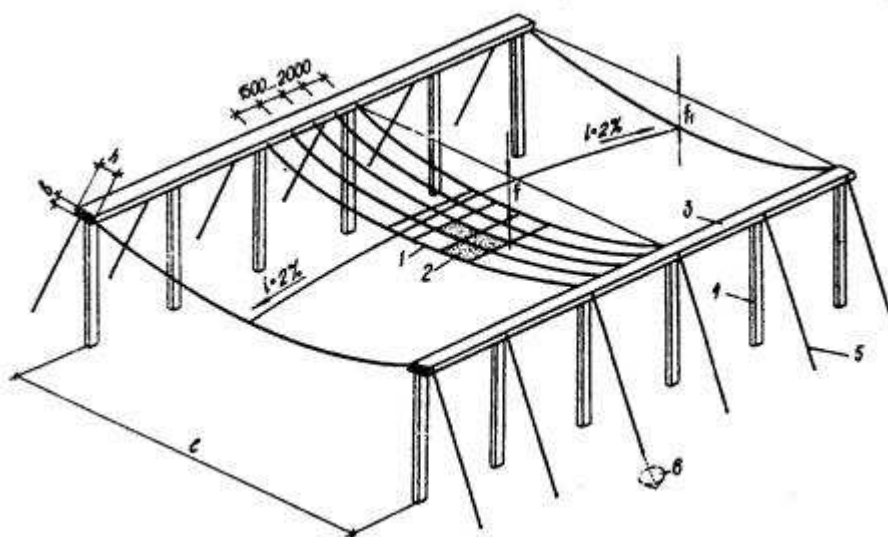


Рис. 19. Схема вантовых покрытий с прямоугольным планом здания:

f – стрела провеса каната в середине здания; f_1 – то же, у торцов; 1 – несущие канаты; 2 – кровельные панели; 3 – бортовой элемент; 4 – стойка; 5 – оттяжка; 6 – анкерный диск

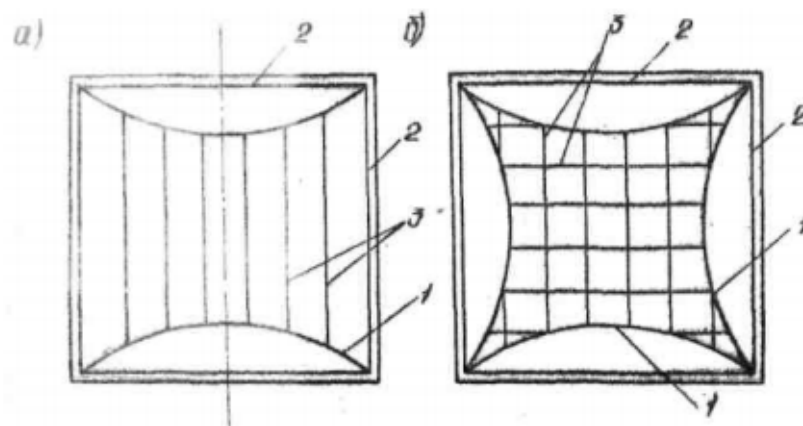


Рис. 20. Использование тросов-подборов в висячей оболочке на прямоугольном плане
 а – система параллельных вант, б – ортогональная вантовая сеть; 1 – тросы-подборы, 2 – сжатые элементы опорного контура; 3 – ванты

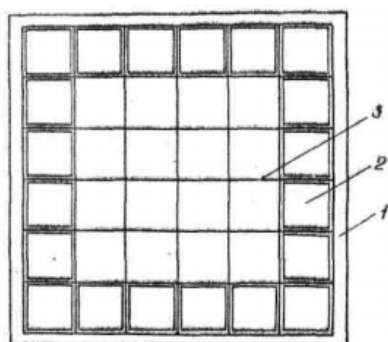


Рис. 21. Опорный контур, усиленный приконтурным рядом плит:
 1 – опорный контур, 2 – плита, 3 – ванты

Круглый план здания

В круговых покрытиях ванты располагаются радиально (рис. 22). При действии на покрытие равномерно распределенной нагрузки усилия во всех тросах одинаковы, а наружное опорное кольцо равномерно сжато. В этом случае отпадает необходимость в устройстве анкерных фундаментов. При неравномерной нагрузке в опорном кольце могут возникать изгибающие моменты, которые необходимо учитывать и не допускать избыточных моментов.

Для круговых покрытий применяют три основных варианта опорных конструкций:

- с передачей распора на горизонтальное наружное опорное кольцо;
- с передачей усилий в тросах на наклонное наружное кольцо;

- с передачей распора на наклонные контурные арки, опирающиеся на ряд стоек, которые воспринимают вертикальные усилия от покрытия.

Для восприятия усилий в арках их пяты опирают на массивные фундаменты, либо связывают затяжками.

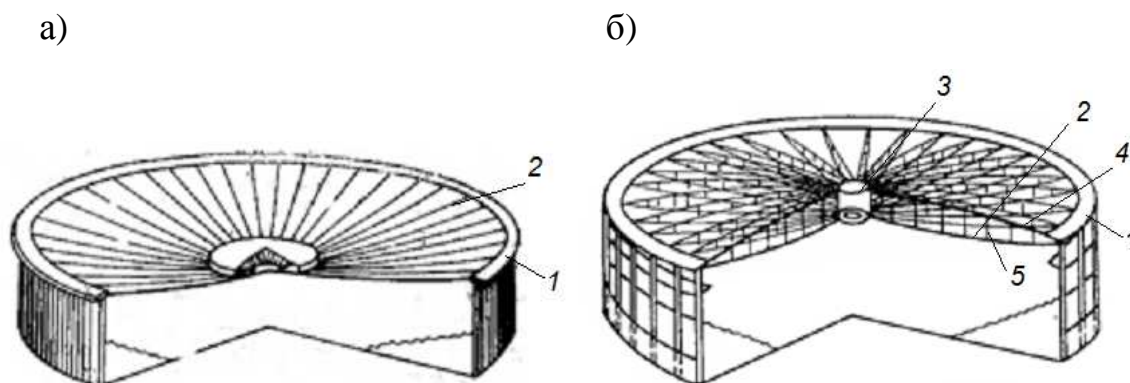


Рис. 22. Пример вантовых конструкций с круглым планом здания;

а - с одноясным вантовым покрытием; б - с двухясным вантовым покрытием
1 – опорный контур; 2 – несущие ванты; 3 – внутреннее кольцо; 4 - стабилизирующие ванты; 5 - распорки

По форме поверхности, образованной вантами

По форме поверхности, образованной вантами выделяют поверхности:

- одноясные;
- двухясные.

Одноясные системы

Одноясные системы могут быть выполнены над помещением прямоугольной формы (рис. 23) или над круглым (иногда овальным) помещением (рис. 24). В последнем случае в середине помещения может быть установлена дополнительная опора, позволяющая увеличить размеры перекрываемых пролетов и обеспечивающая более удобное водоотведение с покрытия. В покрытиях на прямоугольном (или квадратном) плане водоотвод обеспечивают постепенным увеличением стрелы провеса канатов от середины к торцам, создавая уклон кровли 1,5...2%.

Восприятие распора канатов обеспечивается различными способами, в том числе с помощью оттяжек (рис. 23), пилонов, пристроек к зданию и т.д.

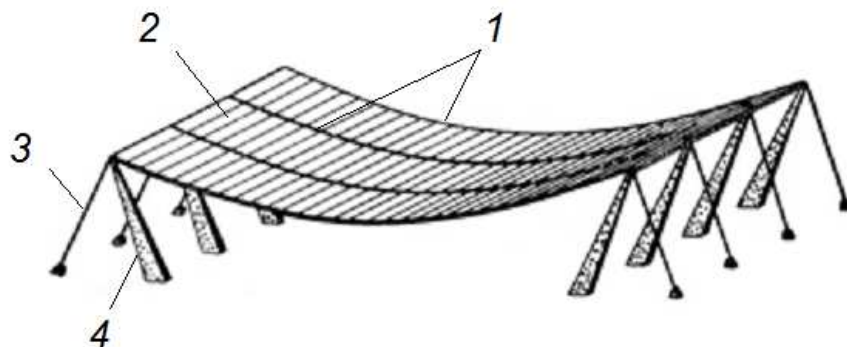


Рис. 23. Пример вантовых конструкций с однопоясным вантовым покрытием с параллельными вантами;

1 – ванты; 2 – элементы покрытия (кровля); 3 – оттяжки; 4 – опоры (стойки)

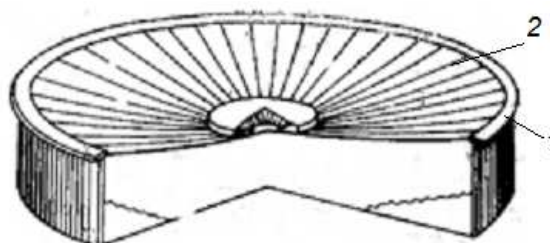


Рис. 24. Пример вантовых конструкций с однопоясным вантовым покрытием с радиальными вантами;

1 – опорный контур; 2 - ванты

Двухпоясные системы

Двухпоясными системами называются такие, которые состоят из двух гибких нитей, расположенных друг над другом, связанных между собой распорками или растяжками и совместно работающими на восприятие внешних нагрузок (рис. 25). Совместная работа нитей обеспечивается предварительным напряжением, что позволяет уменьшить упругие деформации и кинематические перемещения по сравнению с однопоясными системами и создает условия для применения легких кровель. Пояса с положительной кривизной, стрелка провеса которых направлена вниз, являются несущими, а пояса с отрицательной кривизной – стабилизирующими.

Наиболее распространены конструктивные формы двухпоясных систем на круглом плане с радиально расположенными тросами (рис. 26).

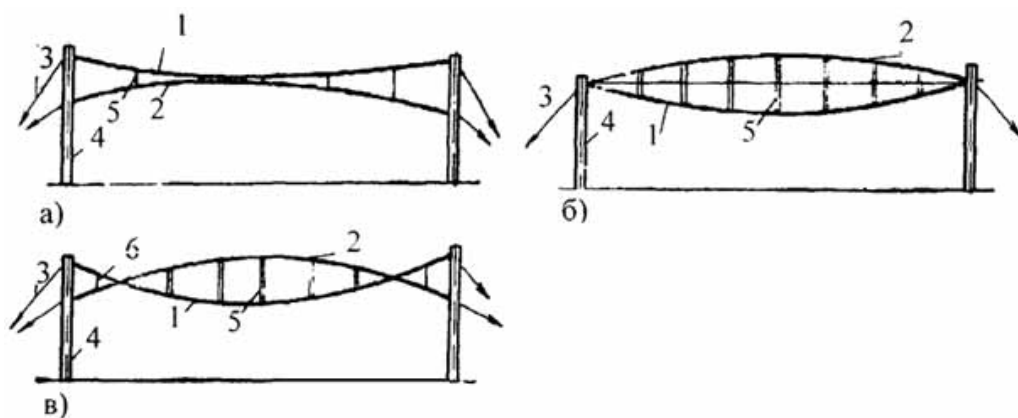


Рис. 25. Схемы двухпоясных висячих покрытий
 а - вогнутая; б - выпуклая; в - выпукло-вогнутая; 1 - несущая ванта; 2 - стабилизирующий трос; 3 - оттяжки; 4 - опора; 5 - жесткие распорки; 6 - гибкие затяжки

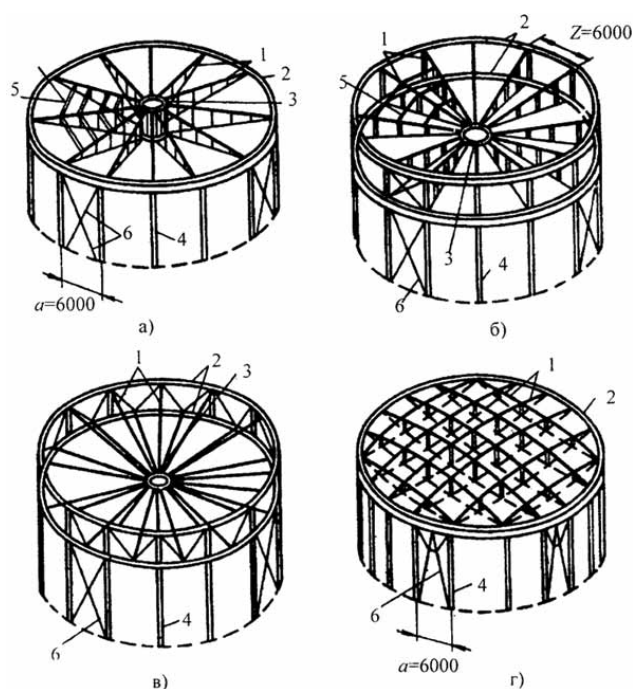


Рис. 26. Пример вантовых конструкций с двухпоясным вантовым покрытием с радиальными вантами

а - радиальная с двухпоясным центральным кольцом; б - радиальная с двухпоясным опорным кольцом; в - радиально-складчатая с двухпоясным опорным кольцом; г - ортогональная система из перекрещивающихся вантовых ферм с опорным кольцом; 1 - несущие ванты; 2 - опорное кольцо; 3 - центральное кольцо; 4 - колонны; 5 - прогоны; 6 - связи

3.4.1 Конструктивные элементы вантовых покрытий

Все элементы вантовых покрытий взаимосвязаны между собой и должны рассматриваться комплексно. Однако для простоты изложения рассмотрим эти элементы поочередно: сначала сами ванты, затем опорные

конструкции, анкерные устройства, узлы примыкания отдельных элементов друг к другу и связи.

Ванты

Ванты - несущие элементы стержневого типа, работающие в основном на растяжение. В качестве вант, представляющих собой основной элемент покрытия, используются:

- стальные тросы и канаты;
- арматурные пучки и пряди из высокопрочной проволоки
- отдельные арматурные стержни (струны).

Другие виды стальных изделий, как, например, полосовая и профильная прокатная сталь, применяются в вантовых системах значительно реже. Неметаллические (синтетические) материалы пока еще не могут быть рекомендованы для стационарных сооружений.

Стальные канаты состоят из проволоки с расчетным пределом прочности от 100 до 280 кГ/мм². В зависимости от методов изготовления канаты подразделяются на одинарной, двойной и многократной свивки.

Недостатком канатов как материала для вант является их сравнительно невысокий первоначальный модуль упругости по сравнению с прокатной и арматурной сталью, что объясняется их витой структурой. Если модуль упругости канатной проволоки составляет около 2 000 000 кГ/см², то для канатов одинарной свивки он на 15 - 35% меньше, а для канатов двойной свивки — на 60 - 65%. Для повышения первоначального модуля упругости канаты предварительно вытягиваются усилием, составляющим 65 - 75% разрывного усилия каната, в течение 0,5 - 2 час. При этом модуль упругости канатов повышается, достигая в среднем 1 700 000 кГ/см².

Пучки и пряди обычно изготавливаются из высокопрочной круглой проволоки. Диаметр проволоки для пучков и прядей, используемых в вантовых покрытиях, принимается не менее 2-3 мм. Через 70-100 см пучки проволоки связываются мягкой вязальной проволокой диаметром 1-1,5 мм.

Арматурная сталь, круглая, полосовая или периодического профиля имеет прочностные характеристики ниже, чем у канатов и пучков, но она менее деформативна и более коррозиестойчива, что позволяет применять лишь защитную окраску, сварку и более простые узловые соединения.

Натяжение вант

Ванты висячих покрытий обычно натягивают теми же методами, которые применяются при создании предварительного напряжения в железобетонных конструкциях. Чаще всего натяжение производится с помощью специальных гаечных ключей или гидравлических домкратов. Величина усилия предварительного напряжения тщательно контролируется.

Распространен также способ создания предварительного напряжения покрытия с помощью пригрузки. Он заключается в следующем. Вантовую сетку загружают нагрузкой, несколько превышающей эксплуатационную. Укладывают плиты покрытия (или монолитный железобетон), замоноличивают швы, и после схватывания бетона снимают нагрузку. Ванты, стремясь вернуться в исходное положение, обжимают покрытие, создавая предварительно напряженную оболочку. Теперь даже при максимальной эксплуатационной нагрузке покрытие будет сохранять полученное им предварительное напряжение.

Опорные конструкции

Наиболее просто опорные конструкции выполняются при замкнутом контуре. Замкнутый опорный контур, как правило, работает на сжатие. Возможно несколько удачных вариантов решения опорных конструкций с незамкнутым контуром. К их числу относятся контрфорсы или поперечные стены (рис. 27, а), жесткие рамы (рис. 27, б), наклонные анкерные стяжки (рис. 27, в) и вертикальные оттяжки, в которых удерживающие силы слагаются из отвеса стены и усилия в анкере (рис. 27, г).

Одним из наиболее эффективных и простых в работе типов анкерного фундамента являются винтовые сваи (рис. 27, д). В этом случае не требуется

больших объемов земляных работ, которые необходимы при применении анкерных плит. Кроме винтовых свай, в качестве анкеров могут применяться буровые сваи с уширенной пятой, камуфлетные сваи и обычные висячие забивные сваи.

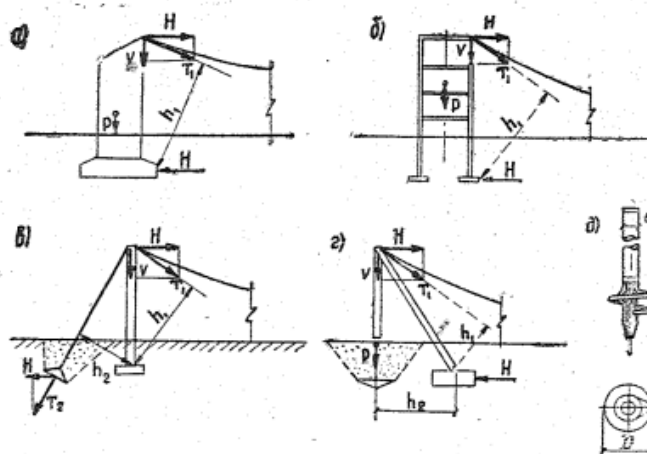


Рис. 27. Опорные конструкции для зданий с незамкнутым контуром:

а – контрфорсы или поперечные стены; б – жесткие рамы; в – наклонные анкерные стяжки; г – вертикальные оттяжки; д – винтовые сваи

Анкерные устройства

Ванты закрепляются на опорной конструкции при помощи анкерных устройств, назначение которых - надежная заделка вант на всех стадиях работы конструкции. На одном из концов вант должна быть обеспечена возможность регулирования их длины и изменения их провеса и натяжения. Для изготовления анкеров обычно применяют твердые стали, например, 40Х, и др. Для повышения твердости анкерных устройств рекомендуется их термическая обработка. Ванты из стержневой стали проще всего закреплять при помощи приваренных нарезных хвостовиков увеличенного диаметра, снабженных гайкой (рис. 28, а)

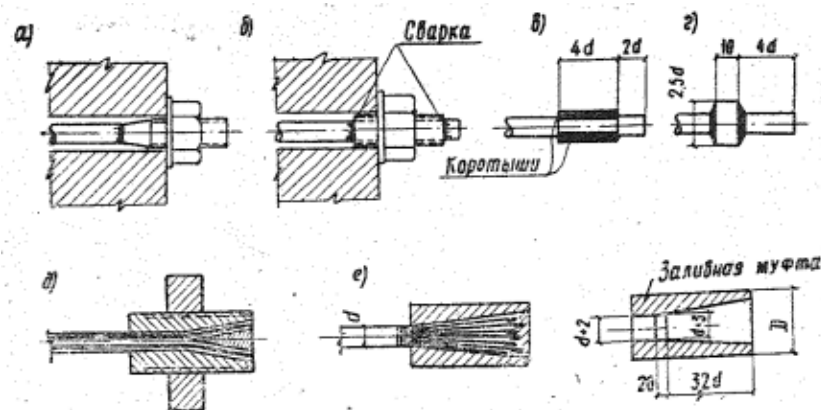


Рис. 28. Крепление вант из отдельных стержней, пучков и канатов

а - нарезные хвостовики увеличенного диаметра, снабженные гайкой; б – приварная нарезная втулка; в – приваренные коротыши; г – шайбы, д – гильзоклиновые анкеры; е – втулка, заливаемая специальными сплавами

Удобно также крепить ванты с помощью приварной нарезной втулки (рис. 28, б). Оба этих способа позволяют легко регулировать длину вант.

Анкеровка с помощью приваренных коротышей (рис. 28, в) или шайб (рис. 28, г) не позволяет регулировать длину вант также, как и приварка концов вант к стальным закладным деталям, закрепленным к опорной конструкции.

Стыки отдельных отрезков вант из арматурных стержней следует осуществлять сваркой на контактных стыковых машинах. Если ванты из стержневой арматуры подвергаются силовой калибровке (упрочнению натяжкой), то это осуществляют после их сварки и приварки хвостовиков, что позволяет проверить прочность сварных соединений.

Для крепления вант из стальных канатов можно применять гильзоклиновые анкеры (рис. 28, д) или втулки, заливаемые специальными сплавами с температурой плавления в диапазоне 300-480 °С (рис. 28, е) [2].

3.4.2 Первые здания с висячими конструкциями В.Г. Шухова

В 1896 г. в Нижнем Новгороде была организована Всероссийская художественная и промышленная выставка – показательный смотр достижений России в ремесленном производстве и промышленности. Впечатляющий ряд сооружений (рис. 29), 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 гиперболоида.

Висячие покрытия были у трех зданий строительного и инженерного отдела: выставочного павильона с круглым планом и двух продольных зданий с прямоугольным планом (рис. 30,31), и, кроме того, у четвертого павильона с овальным планом – здания, завершающего заводско-ремесленный отдел.



Рис. 29. 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».

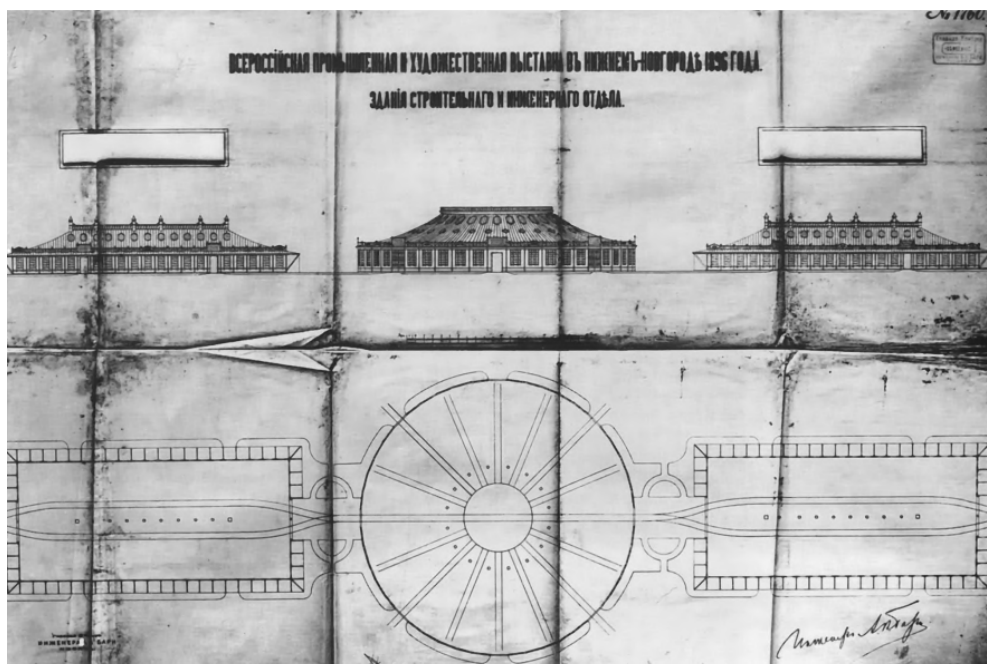


Рис. 30. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Ротонда и прямоугольные здания строительного и инженерного отдела с деревянными покрытиями. Чертеж с фасадами и планами (69,6 x 103 см)



Рис. 31. 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. 32) (диаметр 68,3 м, высота 15 м) 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 x 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. 33).

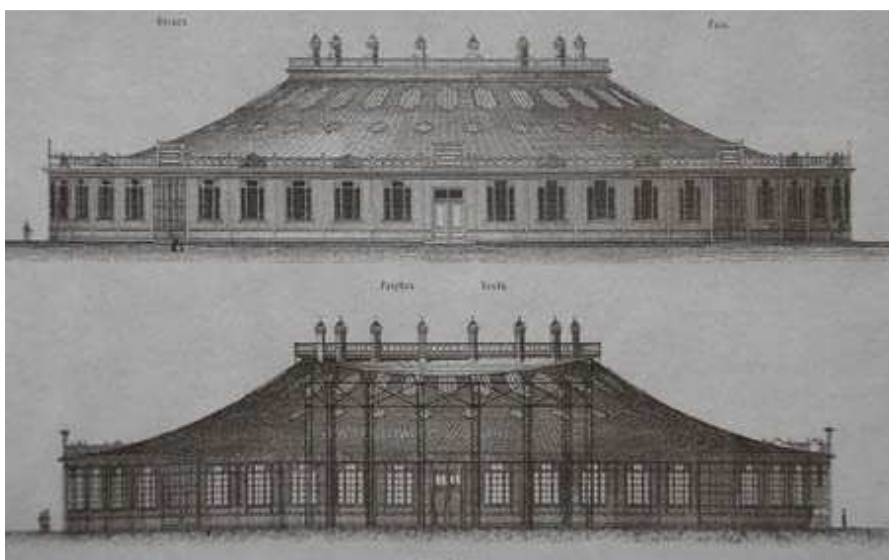


Рис 32. Инженерно-строительный павильон круглой формы Всероссийской художественной и промышленной выставки в Нижнем Новгороде с висячим покрытием, запроектированным В. Г. Шуховым (фасад, разрез)

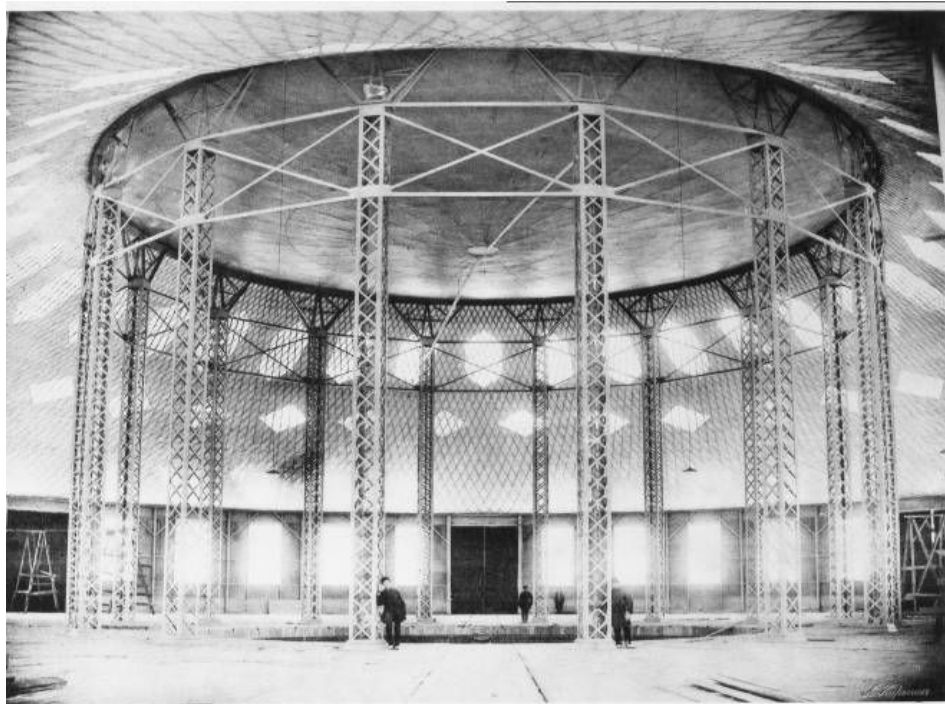


Рис. 33. Инженерно-строительный павильон круглой формы Всероссийской художественной и промышленной выставки в Нижнем Новгороде с висячим покрытием, запроектированным В. Г. Шуховым

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 [3].

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

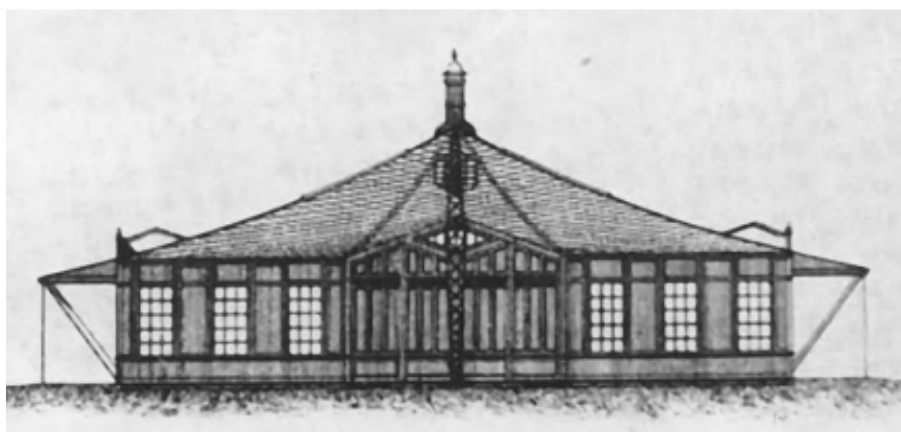


Рис. 35. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Прямоугольный выставочный павильон с висячим покрытием, поперечный разрез

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. 35).

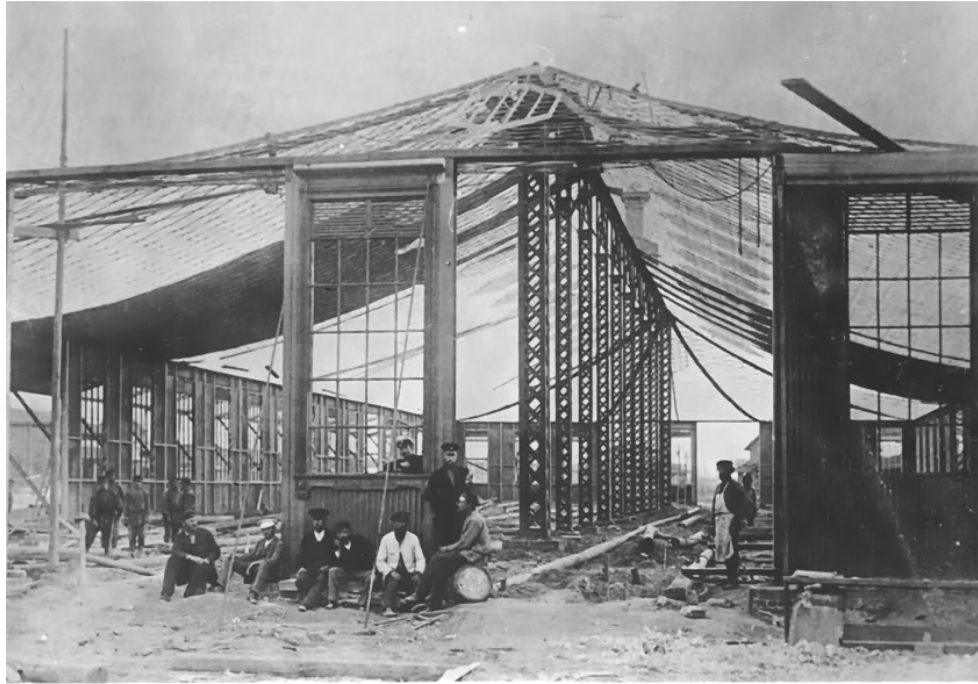


Рис. 36. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Прямоугольный выставочный павильон во время строительства

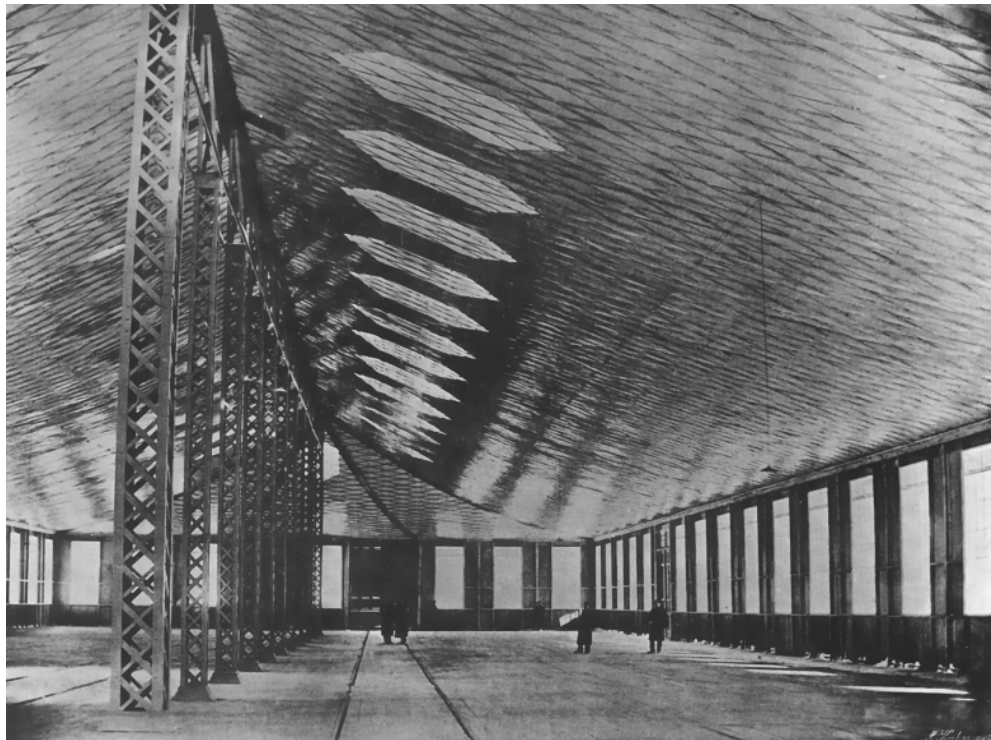


Рис. 37. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Прямоугольный выставочный павильон, интерьер

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. 36, 37).

Все сетчатые покрытия накрыты, как обычно в России, оцинкованным железом, которое крепилось по ячейкам непосредственно к сетке (рис. 38). Такая кровля, прежде всего для покрытий прямоугольных павильонов, способствовала повышению устойчивости. В то время как устойчивость покрытия ротонды достигалась за счет двойкой кривизны его 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. 38) является комбинацией обеих форм висячих покрытий. Над узкими сторонами, которые имели в плане полукруглую форму, подвешивались сети в форме поверхности двойкой кривизны, а между прямыми сторонами находились две прямоугольные сети с одинарной кривизной (рис. 39,40). 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 [3].



Рис. 38. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Овальный выставочный павильон, внешний вид

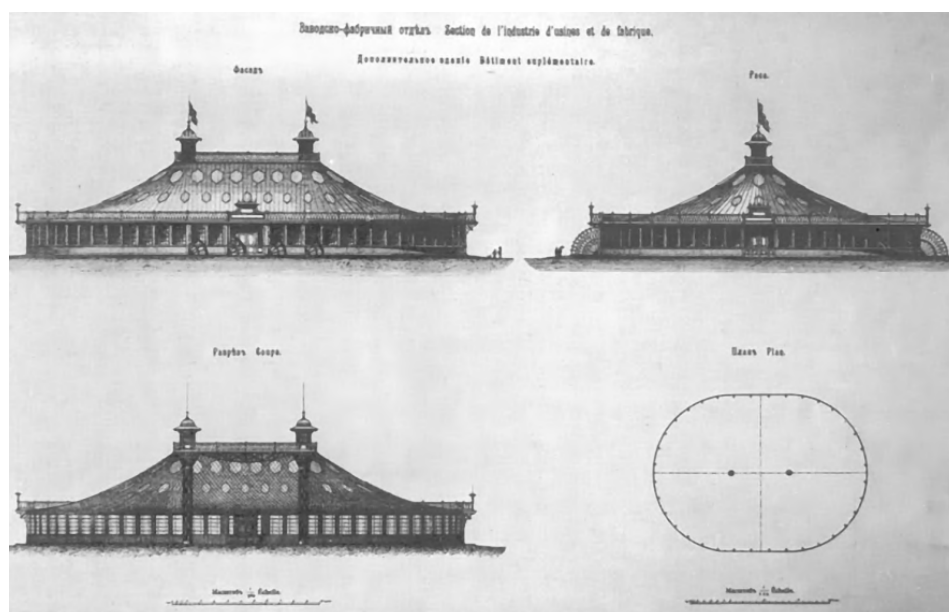


Рис. 39. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г. Овальный выставочный павильон с висячим покрытием; фасады, продольный разрез и план, 1896 г.

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, нежели 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. 40, 41).

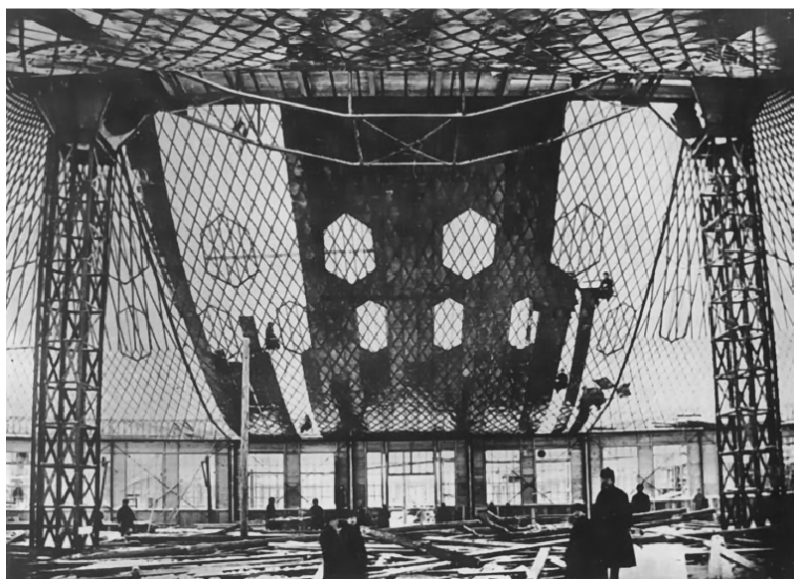


Рис. 40. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г., выставочный павильон, интерьер во время покрытия сетки кровлей

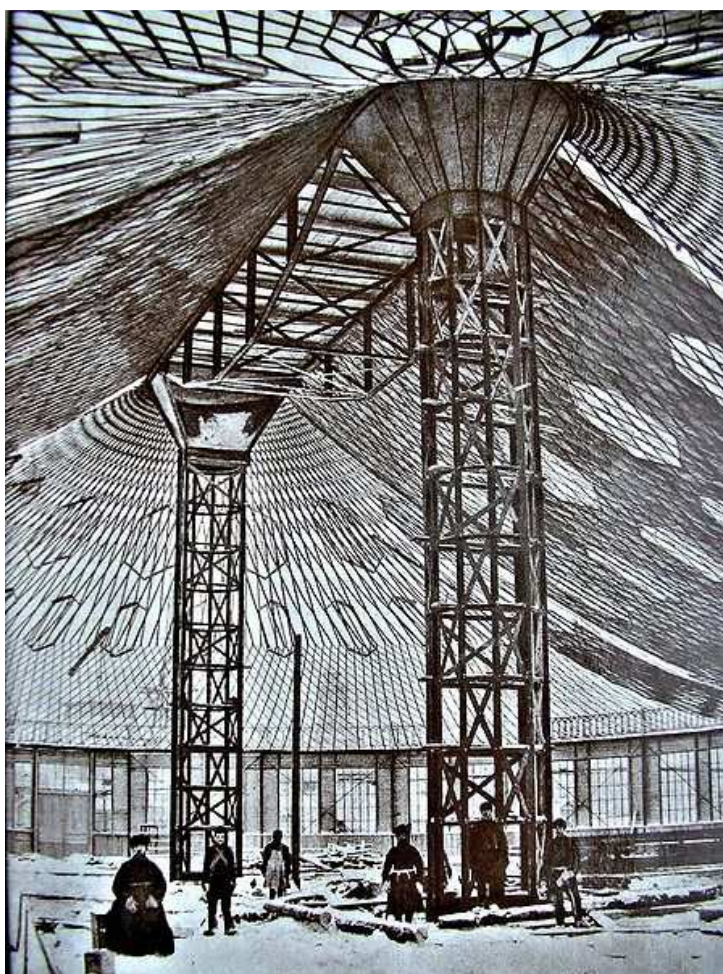


Рис. 41. Всероссийская промышленная и художественная выставка в Нижнем Новгороде, 1896 г., выставочный павильон, интерьер во время покрытия сетки кровлей

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.

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 [3].

4 Формы геометрических поверхностей и конструктивные особенности висячих покрытий зданий и сооружений. Отечественный и зарубежный опыт

4.1 Покрытия на круговом плане

Одним из простейших видов висячих покрытий в форме поверхности вращения является грибовидное покрытие. На жестко заделанной стойке (рис. 42) укреплено покрытие, образованное двумя мембранами или вантовыми сетками, закрепленными в сжатом контурном кольце; возможно комбинированное решение, когда в верхней части покрытия располагается мембрана, а нижняя состоит из сетки вант. Наличие нижней мембраны или сетки необходимо для предотвращения опрокидывания покрытия (или перекоса) при неравномерном нагружении. Мембраны или сетки могут быть предварительно напряжены, чем повышается жесткость конструкции. Примером таких покрытий могут служить *грибовидные павильоны, построенные на выставке цветов в Касселе в 1955 г.* (рис. 7) [11].

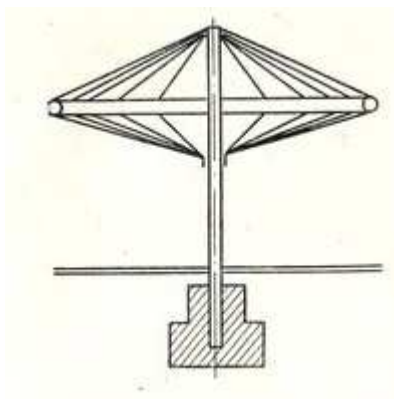


Рис. 42. Разрез грибовидного висячего покрытия

При значительных пролетах такая конструкция становится нерациональной. Выгоднее опереть сжатое контурное кольцо на стойки (рис. 43). Все горизонтальные усилия воспринимаются сжатым кольцом и поэтому стойки можно делать сравнительно тонкими. Центральная опора воспринимает значительную вертикальную нагрузку, величина которой зависит от принятой стрелы провисания вант или мембраны.

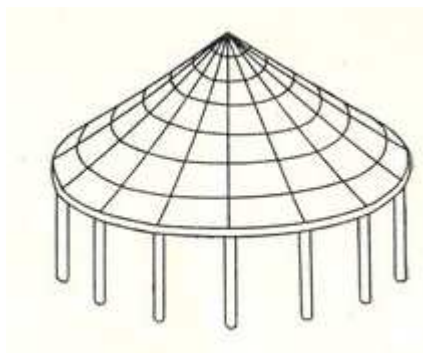


Рис. 43. Висячее покрытие кругового очертания в плане с центральной опорой

Контурные колонны можно заменить на предварительно напряженные оттяжки. Целесообразность применения такого решения зависит от свойства грунта, который должен обеспечить анкеровку этих оттяжек.

На рис. 44 и 45 показан круглый павильон, висячее покрытие которого поддерживается тремя внутренними колоннами.

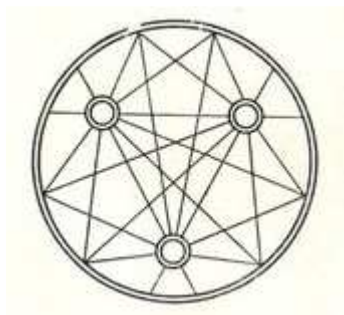


Рис. 44. Круглое висячее покрытие павильона с тремя внутренними опорами. План покрытия

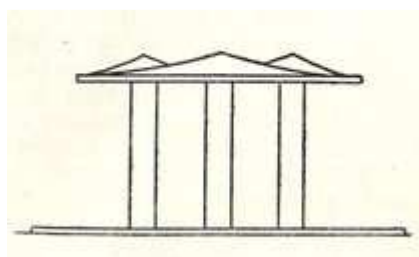


Рис. 45. Круглое висячее покрытие павильона с тремя внутренними опорами. Фасад

Строительство его осуществлялось в следующей последовательности. Между внутренними кольцами, расположенными на колоннах, и контурным кольцом были закреплены ванты диаметром 8 мм. К ним была снизу прикреплена легкая проволочная сетка, затем контурное кольцо загрузалось монтажной пригрузкой, после чего было проведено бетонирование. Эта

конструкция представляет интерес прежде всего с архитектурной точки зрения, но имеет и ряд конструктивных преимуществ, в частности она обладает большей жесткостью, чем покрытия с одной центральной опорой.

4.2 Покрытия с опиранием по контуру

В круглых покрытиях с опиранием по контуру без несущей колонны в центре центральная часть помещения остается свободной от опор.

Радиальные ванты таких покрытий обычно натянуты между двумя кольцами, одно из которых (внешнее) сжато, а другое (внутреннее) растянато. С точки зрения статики такие покрытия очень эффективны, вследствие этого они могут применяться для перекрытия больших пролетов. Недостатком этих конструкций является необходимость устройства внутреннего водостока. Обычно вода со всего покрытия стекает в кольцевой желоб и оттуда отводится по трубам, расположенным внутри перекрытого пространства. Засорение труб может привести к недопустимой перегрузке покрытия. Этот недостаток можно устранить, дав достаточный наклон контурному кольцу; тогда вода будет стекать к краю покрытия (рис. 46).



Рис. 46. Наклонное висячее покрытие

Более удобен отвод воды – в висячих покрытиях, имеющих уклон к контуру. Чтобы получить такое направление стока, внутреннее кольцо делают в виде высокого цилиндра. Между контурным кольцом и внутренним цилиндром натягиваются две системы вант. Верхняя вантовая система несет собственно крышу, а нижняя поддерживает на определенной высоте центральный цилиндр. Сооружением такого типа является *павильон США на*

Всемирной выставке в Брюсселе (рис. 47) [8]. Покрытие опирается по контуру на 72 колонны, которые расположены по двум concentрическим окружностям диаметром 92 и 104 м. Высота колонн 22 м, изготовлены они из труб диаметром 318 мм с толщиной стенок 24 мм. Внешнее кольцо выполнено в виде фермы, ширина его 6 м. Диаметр внутреннего цилиндра 20 м, высота 8,5 м. Цилиндр образован из двух стальных колец, связанных между собой решеткой. Верхняя система вант состоит из 76 вант диаметром 32 мм, а нижняя система – из 36 вант диаметром 54 мм. Пространство внутри среднего кольца не перекрыто, и дождевая вода попадает прямо в бассейн, расположенный в центре павильона.



Рис. 47. Павильон США на Всемирной выставке в Брюсселе

4.3 Цилиндрические висячие покрытия

Висячие покрытия цилиндрической формы получили довольно широкое распространение. В зависимости от типа пролетной конструкции они могут быть вантовые, составленные из вант и балок, мембранные или армированные.

Вантовые цилиндрические покрытия образуются системой параллельных вант, на которые укладывают панели покрытия. Большим преимуществом цилиндрических висячих покрытий является возможность применения одинаковых элементов ограждения, которые изготавливаются заранее.

Поверхности покрытий цилиндрической формы являются поверхностями одинарной кривизны. Цилиндрические висячие покрытия

устанавливаются чаще всего над помещениями с прямоугольным планом, но возможны решения и на планах другой формы. Они могут быть образованы конструкциями одноярусных и двухярусных вантовых систем с параллельным расположением тросов, а также параллельно расположенными жесткими вантами.

Покрытие из одиночных тросов на прямоугольном плане образует вогнутую цилиндрическую поверхность с небольшим постепенным понижением (уклон примерно 2%) по направлению от центра покрытия к торцам здания для обеспечения водосброса. Шаг вант вдоль здания рекомендуется назначать 1,5 – 2 м. Кривизна вогнутой цилиндрической поверхности зависит от стрелы провисания покрытия, которую рекомендуется назначать в пределах $1/10$ – $1/25$ пролета.

При образовании цилиндрического покрытия одноярусной вантовой системой, есть возможность добиться большей архитектурной выразительности сооружения за счет различной ориентации покрытия в пространстве, например, путем расположения бортовых элементов, к которым осуществляется крепление несущих вант, на разных отметках. Примером такого сооружения может служить *двухзальный кинотеатр в Ереване* (рис. 48) или городской зал в Бремене.

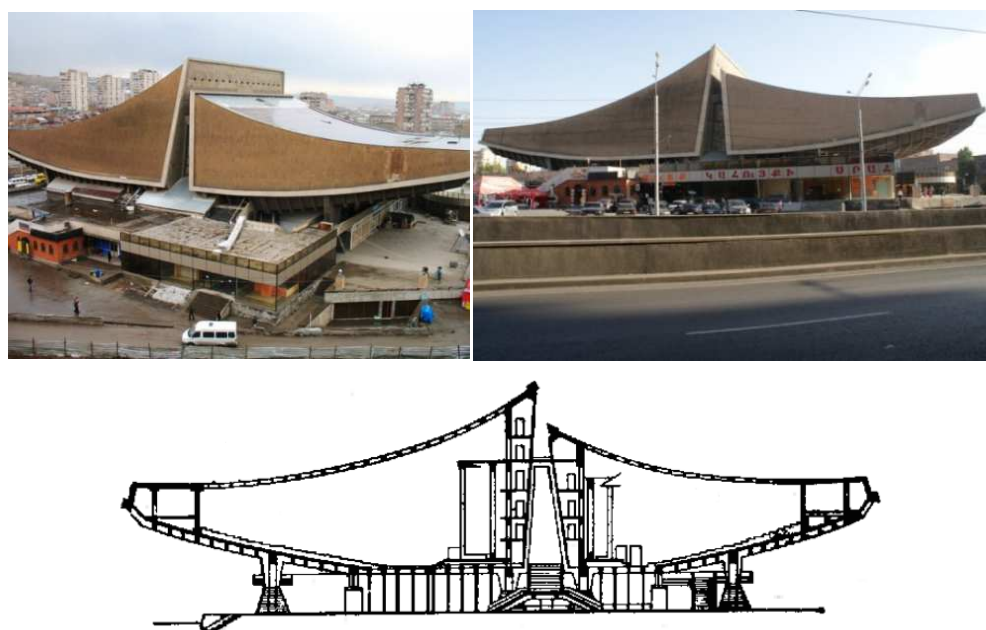


Рис. 48. Двухзальный кинотеатр «Россия» в Ереване: общий вид и разрез

Вантовое двухпоясное покрытие с параллельными вантами может образовывать как вогнутое, так и выпуклое цилиндрическое покрытие в зависимости от кривизны верхнего троса вантовой системы (рис. 49).

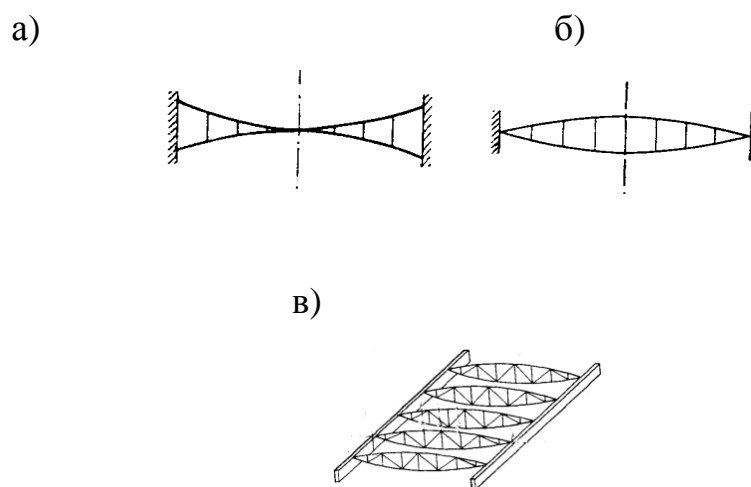


Рис. 49. Двухпоясное покрытие с параллельными вантами, образующее: а – вогнутую цилиндрическую поверхность; б, в – выпуклую цилиндрическую поверхность

Примером цилиндрического покрытия, образованного двухпоясной вантовой системой, служит *автобусный парк в Берлине «Вайсензее»*.

Для покрытия больших площадей возможно использование многопролетного покрытия путем сочетания нескольких параллельно расположенных цилиндрических поверхностей (рис. 50).

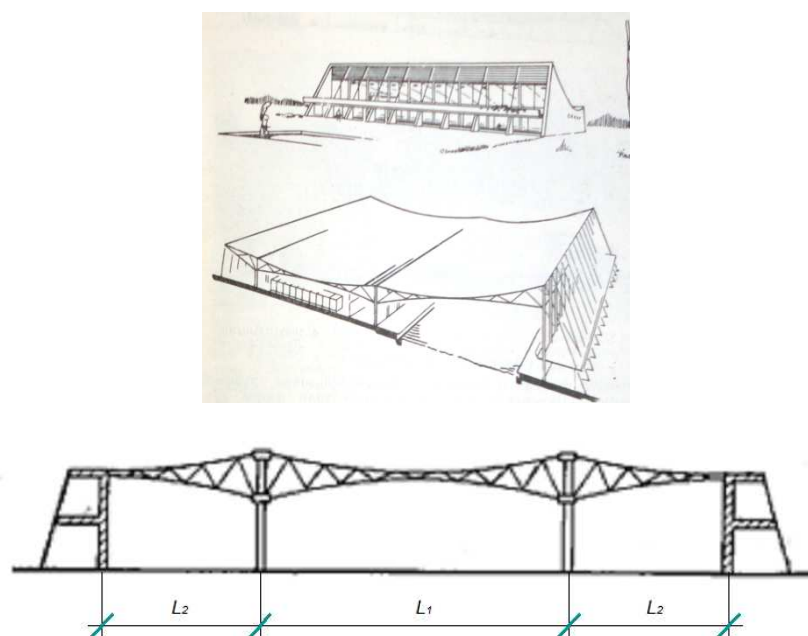


Рис. 50. Примеры зданий с многопролетным покрытием из цилиндрических поверхностей

Другим примером висячей системы покрытия с применением цилиндрических поверхностей может служить конструкция покрытия здания павильона СССР на Всемирной выставке в Брюсселе [7] (1958 г.) (рис. 51). Ванты с одной стороны прикреплены к консоли несущей конструкции покрытия и через стойки наружного каркаса к фундаментам, а с другой стороны нагружены весом средней части покрытия (рис. 52).



Рис. 51. Выставочный павильон СССР на выставке в Брюсселе, 1958 г.;

а – внешний вид; б – интерьер павильона

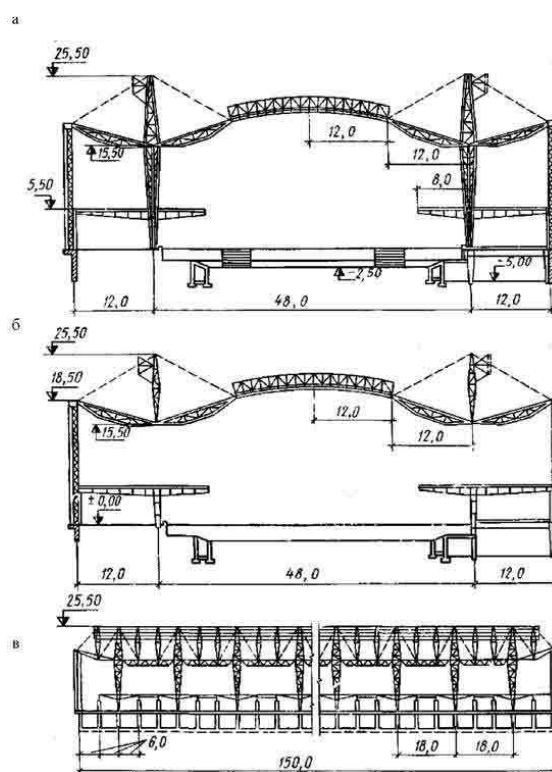


Рис. 52. Консольно-вантовое покрытие павильона СССР на выставке в Брюсселе:

а – разрез по основной конструкции; б – разрез по промежуточной конструкции;

в - продольный разрез

В плане павильон представлял собой параллелепипед длиной 150 м, шириной 72 м и высотой 22 м. Стальной каркас состоял из рам и двух рядов колонн, к ним были подвешены на вантах перекрытия и стеклянные стены. В интерьере было сформировано единое выставочное пространство. Необычным было все: суживающиеся книзу решетчатые стальные несущие колонны, серебристое кружево алюминиевых ферм перекрытия, гофрированный световой фонарь. Наружный облик павильона был сформирован стеклянными гофрированными плоскостями стен, как бы затканными нитями алюминиевого каркаса. Эти тянувшиеся сверху вниз нити призваны были наглядно показать отсутствие несущих функций у навесной стены. Наверху помещался ажурный «аттик» из алюминиевых профилей - вантовую конструкцию на крыше все же не решились открыть на всеобщее обозрение. Невесомость дематериализованной стены усиливала каркасная конструкция герба СССР, помещенного на главном фасаде. Стилизованный герб состоял из множества тонких алюминиевых пластинок двутаврового сечения, укрепленных перпендикулярно к плоскости стены.

Покрытие ресторана в Ялте еще одно оригинальное цилиндрическое висячее покрытие, сооруженное по проекту Г. Д. Попова (ЦНИИПроектстальконструкция). Несущими растянутыми элементами являются фермы-панели с двухсторонней тонколистовой обшивкой. Благодаря предварительному напряжению панелей обшивка включена в работу на осевые усилия наравне с каркасом панели (рис. 53). Распор от панелей передается на систему бортовых поперечных элементов, расположенных по боковым сторонам покрытия, а затем на наклонные пилоны-подкосы, закрепленные вертикальными оттяжками к фундаментам[7].

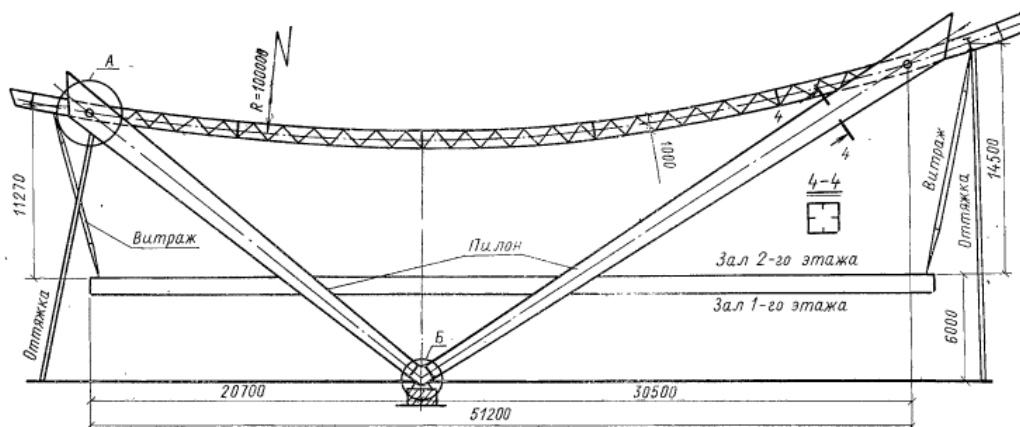


Рис. 53. Ресторан с цилиндрическим покрытием в Ялте

4.4 Вогнутые висячие покрытия

У вогнутых висячих покрытий с перекрестной сеткой вант ванты обоих направлений являются несущими. Жесткость таких конструкций нельзя повысить путем натяжения вант одной системы, как это делается у седловидных покрытий. Это существенный недостаток вантовых систем данного типа.

Примером вогнутого висячего покрытия может служить покрытие бразильского павильона на Всемирной выставке в Брюсселе (рис. 54).

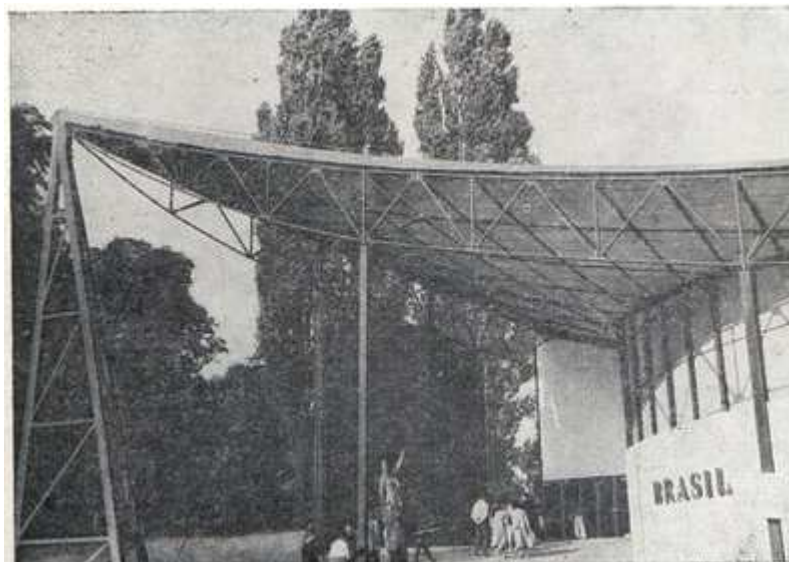


Рис. 54. Фрагмент висячего покрытия бразильского павильона на Всемирной выставке в Брюсселе

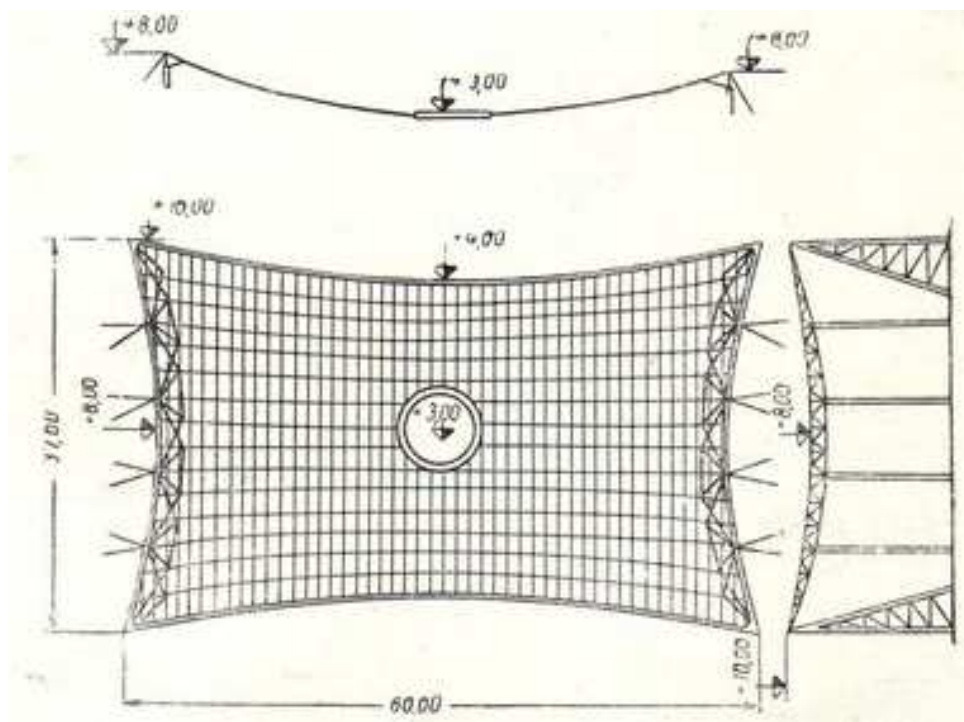


Рис. 55. Схема конструкции Бразильского павильона на Всемирной выставке в Брюсселе

Здание имеет размеры в осях 60 и 37 м. В продольном направлении подвешены стальные ванты диаметром 33 мм, провисающие по квадратным параболам (рис. 55). В поперечном направлении ванты соединены между собой легкими серповидными фермами, пояса которых также очерчены по квадратным параболам. Фермы фиксируют положение вант на определенном расстоянии друг от друга; на них укладываются плиты покрытия из легкого металла[11].

4.5 Седловидные покрытия

Одним из наиболее распространенных видов вантового покрытия являются седловидные покрытия в виде гипаров. Поверхность гиперболического параболоида имеет отрицательную гауссовую кривизну, эти покрытия мало деформативны при действии неравновесных нагрузок и не нуждаются в специальной стабилизирующей конструкции.

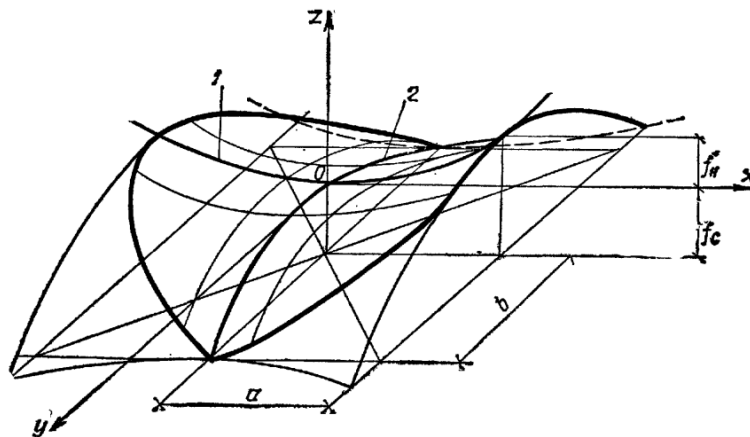


Рис. 56. Гиперболический параболоид:

1 – главная несущая (направляющая) парабола; 2 – главная стабилизирующая (образующая) парабола

Поверхность гипара есть поверхность переноса, т. е. она может быть образована скольжением образующей параболы по направляющей параболе, причем обе эти параболы должны быть разных направлений – выпуклой и вогнутой.

Так как поверхность вантовой сети имеет отрицательную гауссову кривизну, то такая несущая конструкция покрытия является внутренне стабилизированной, что позволяет применять любую конструкцию кровли: от жестких утепленных щитов до тканевых или пленочных покрытий во временных сооружениях. Эта универсальность покрытия, а также возможное разнообразие плана покрытия, особенно для временных сооружений, привели к широкому распространению той конструктивной формы покрытий.

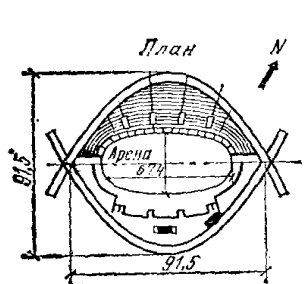
Архитектурной выразительности здания с вантовыми сетями достигают также за счет разнообразия возможных вариантов опирания таких сетей. В качестве опорного контура могут выступать замкнутое опорное кольцо, арочные конструкции, трос подбор, причем положение в пространстве, сочетание с другими конструктивными элементами и архитектурный декор таких опорных конструкций может быть очень разнообразным.

Ярким и наиболее известным зданием с седловидной вантовой сетью в качестве несущей конструкции покрытия на жестком опорном контуре является *Рэлей-арена в США* [1] (рис. 57).

а)



б)



в)

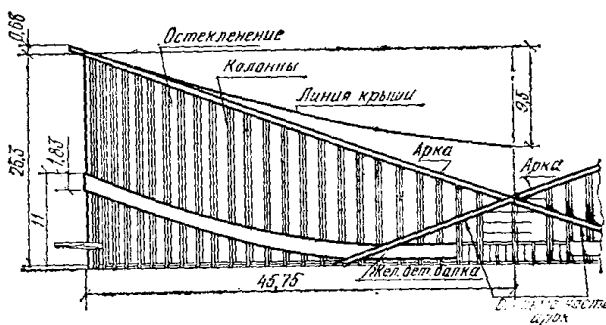


Рис. 57. Спортивный зал «Рэлей-арена» с покрытием в виде ортогональной вантовой сети (США): а – общий вид; б – план; в – фасад

Конструкция покрытия состоит из двух наклонных железобетонных арок параболического очертания, между которыми натянуты продольные и поперечные стальные канаты диаметром 18-34 мм (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 1,83×1,83 м, 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.

Велотрек в Крылатском стал первым подобным сооружением на территории всего бывшего СССР (рис. 58).



Рис. 58. Олимпийский велотрек, Москва

Зал имеет эллипсоидный план, образован двумя гиперболическими параболоидами, симметрично расположенными относительно продольной части здания (рис. 59). Две внутренние почти вертикальные арки жестко заземлены в фундаментах и соединены между собой фермами. Наружные арки занимают положение близкое к горизонтальному и опираются на колонны. Стальная мембрана покрытия толщиной 4 мм образует гиперболическую поверхность, испытывая двухосное напряженное состояние, преимущественно растяжение по направлению ската. В продольном направлении в мембране возникает растяжение от ветрового отсоса и от местного провисания мембраны между направляющими поясами, которые расположены с шагом 6,3 м. Для уменьшения этих напряжений и облегчения монтажа мембраны введены прогоны из гнутых профилей, которые раскрепляют направляющие полосы через 3 м.

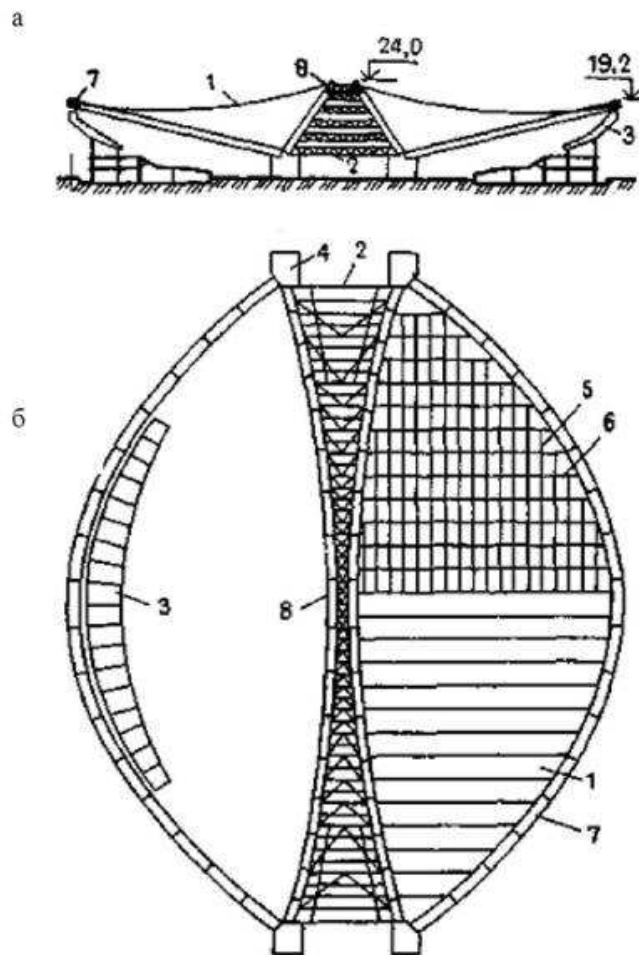


Рис. 59. Велотрек в Крылатском (Москва)

общий вид; а – разрез; б – план покрытия; 1 – стальная мембрана; 2 – ферма; 3 – консоли трибун; 4 – фундамент; 5, 6 – стальные прогоны «постели»; 7, 8 – стальные арки опорного контура

Другим сооружением аналогичного типа является *швейцарский павильон* (рис. 60) на *Немецкой промышленной выставке в Берлине* в 1952 г. Отличительной особенностью этого павильона является его сборно-разборная конструкция. Опорный контур собирается из деревянных клееных элементов.



Рис. 60. Общий вид швейцарского павильона на Немецкой промышленной выставке в Берлине, 1952 г.

Перекрытая площадь имеет форму эллипса с осями 32 и 25 м. На фундаментную клееную обвязку сечением 9,5x25,5 см установлены с шагом 1,24 м 72 деревянные стойки сечением 9,5x19 см, на которые опираются две наклонные (клееные) арки сечением 37,5x12 см. Перпендикулярно большей оси эллипса между арками на расстоянии 2 м друг от друга подвешены 15 несущих вант диаметром 12,3 мм с максимальной стрелой провисания 1,75 м; параллельно большей оси эллипса (перпендикулярно несущим вантам) с шагом 1 м – натягающие ванты диаметром 15 мм с наибольшей впадушностью 1,75 м [11].

Примером сооружения, в котором в качестве геометрической формы покрытия были применены седловидные поверхности, опирающиеся на гибкий опорный контур из тросов-подборов, служит *Олимпийский стадион в Мюнхене*, построенный в 1972 г. по проекту немецкого архитектора Гюнтера Бениша (рис. 61).

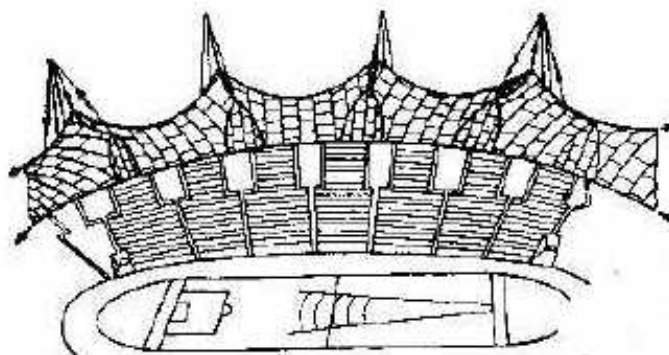


Рис. 61. Олимпийский стадион с покрытием из тросовых сеток двойкой кривизны в г.

Мюнхен (Германия): вверху – вид сверху; внизу – вид сбоку

Покрытие над трибунами в Мюнхене представляет собой совокупность отдельных ячеек из тросовых сеток двойкой кривизны, подвешенных к специальным трубчатым столбам с оттяжками. Все сетки натягиваются одним тросом-подбором, проходящим по краю сеток. К сеткам прикреплены щиты из светопрозрачного пластика.

Формообразующие возможности вантовых сетей покрытий расширяются за счет возможности сочетания нескольких седловидных поверхностей между собой в одном покрытии. Такое решение также можно наблюдать в покрытии Олимпийского стадиона в Мюнхене. Более подробно конструкция седловидной вантовой сети, примененная в этом спортивном сооружении, представлена на рис. 62.

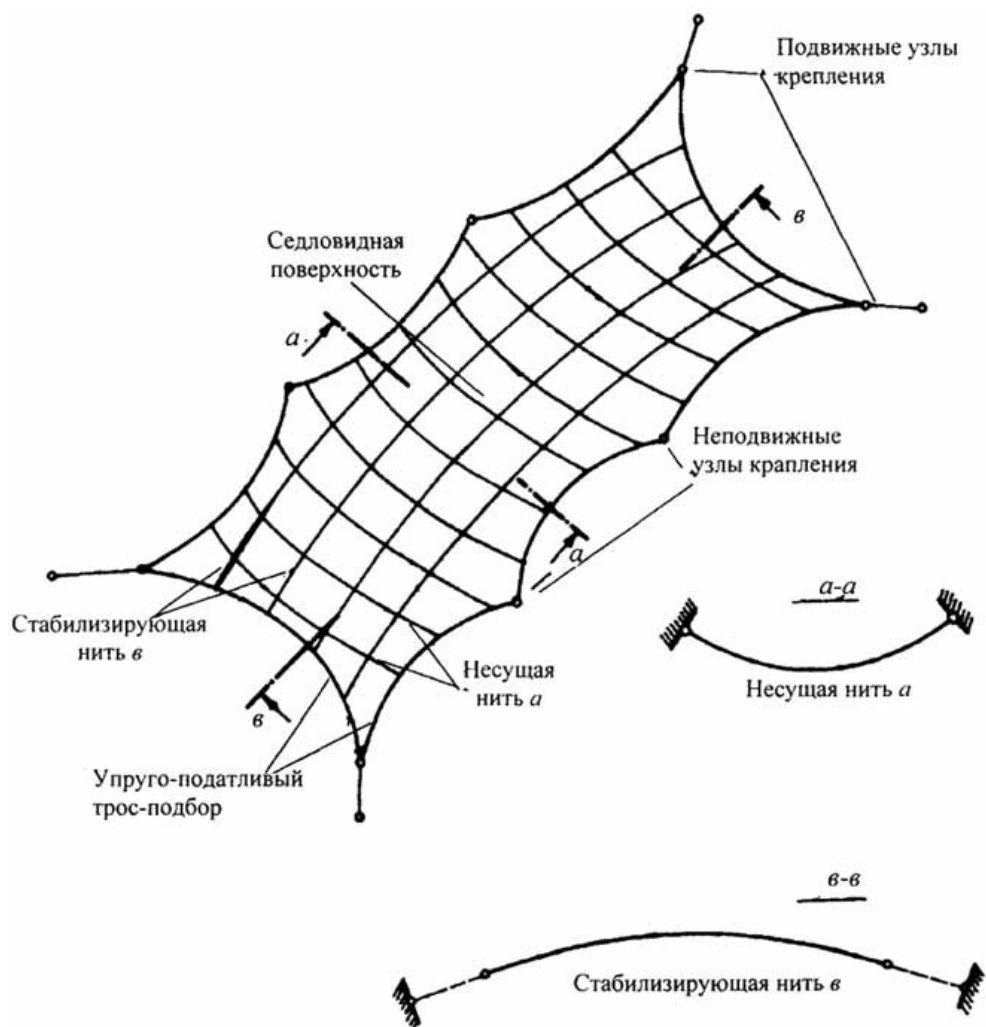


Рис. 62. Схема покрытия криволинейной седловидной сетки на гибком контуре

Седловидные висячие покрытия по простоте, конструктивной логике и архитектурной выразительности являются примером органичного единства конструкции, формы и тектоники висячих систем. В них предельно ясно выражается конструктивная сущность, без посторонних наслоений, затрудняющих восприятие системы.

4.6 Поверхности вращения

Поверхности вращения чаще всего образуются покрытиями, перекрывающими круглые в плане здания.

Для создания поверхностей вращения могут быть использованы следующие виды висячих вантовых покрытий:

- однопоясные вантовые покрытия с радиальным расположением вант;

- двухпоясные вантовые покрытия с радиальным расположением вант;
- тросовые сетки.

Однопоясные покрытия

В круглых вогнутых покрытиях, имеющих форму параболоида вращения (рис. 63), тросы расположены по радиусу на одинаковых расстояниях. Одним концом они прикреплены к железобетонному наружному опорному кольцу, а другим – к внутреннему металлическому кольцу. Это так называемые однопоясные вантовые покрытия с радиальным расположением тросов. Форму такого покрытия иначе можно назвать вогнутой, чашеобразной или перевернутым куполом.

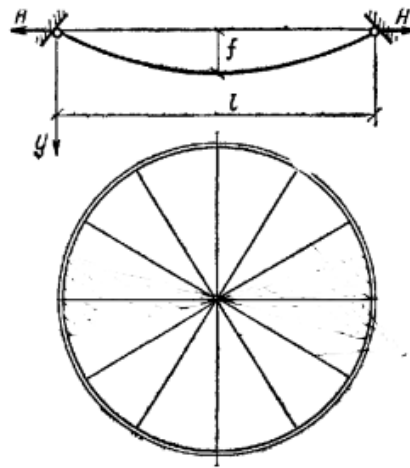


Рис. 63. Схема образования чашеобразного покрытия

Диаметр внутреннего металлического кольца назначается обычно исходя из удобства закрепления в нем тросов (по 35-45 см по длине кольца на один трос) 6-12 м. Круглое наружное опорное железобетонное кольцо (только при такой форме плана возможно получение вогнутой поверхности вращения) является наиболее экономичным решением среди всех однопоясных систем. Примером здания с чашеобразным покрытием служит здание *Бауманского рынка в Москве*, рис. 64.

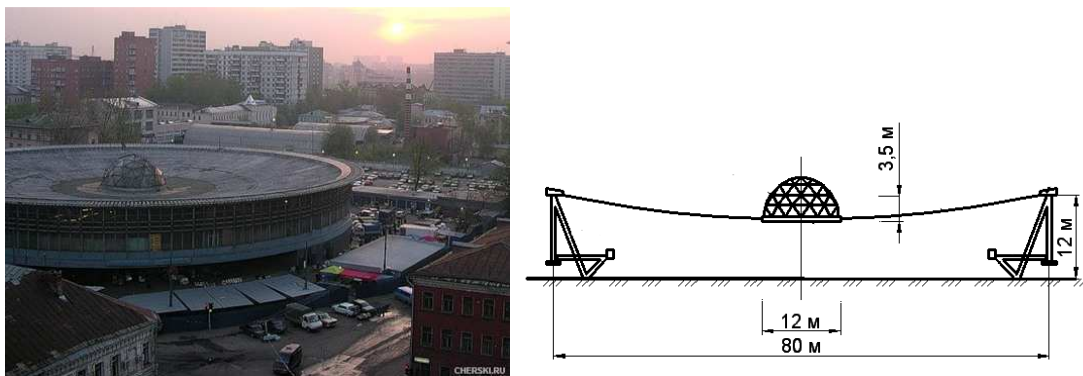


Рис. 64. Бауманский рынок в Москве: общий вид, разрез

Покрытия в виде круглой вогнутой поверхности практически не участвуют в организации видимой внешней формы здания, которая определяется вертикальным ограждением пространства. В его композиционном решении, в трактовке фасадов может более или менее адекватно отражаться характер покрытия.

Наиболее весомой составляющей архитектурной формы такое круглое чашеобразное висячее покрытие становится в интерьере здания. Здесь важную роль играет выявление работы конструкции, так как она более сложна, чем в жестких системах, и не так наглядна, как в цилиндрических вантовых покрытиях. К однопоясным висячим сферическим оболочкам это особенно относится. Их форма в виде перевернутого купола является нетектоничной. Зрительно она ассоциируется с провисанием покрытия под воздействием нагрузки. Введение в вершину свода кольца делает покрытие более тектоничным. Явственно ощущаемое растяжение кольца уравновешивается видимой обжатостью его телом оболочки. В результате создается динамическая, напряженная, но зрительно бесспорная в своей конструктивной надежности форма.

Двухпоясные вантовые покрытия

Поверхности вращения образуют и покрытия с двухпоясной вантовой системой, в этом случае могут быть образованы поверхности как отрицательной, так и положительной гауссовой кривизны, что зависит от формы систем тросов (рис. 65).

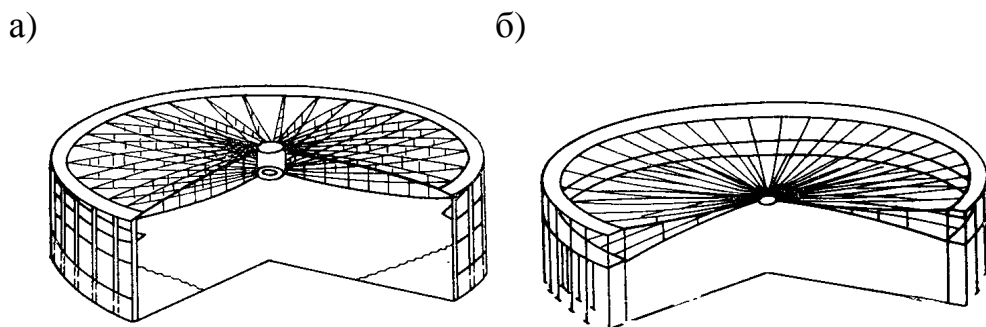


Рис. 65. Двухпоясные вантовые системы, образующие поверхности вращения: а – положительной гауссовой кривизны; б – отрицательной гауссовой кривизны

В таких двухпоясных радиальных системах кольцо, стягивающее тросы, значительно массивней, чем сами висящие на нем тросы. Масса покрытия практически не ощущается, так как оно покоится на тонких тросах и к тому же частично «размыто» образованной этими тросами сеткой. Поэтому центральное кольцо воспринимается не как рабочий элемент покрытия, а как висящая в пространстве форма, что и определяет архитектурную выразительность всего покрытия. Но для этого необходимо, чтобы хорошо просматривалась вся система тонких тросов и массивного кольца, иначе покрытие теряет свою архитектурную роль в интерьере.

Покрытие из вантовых сетей

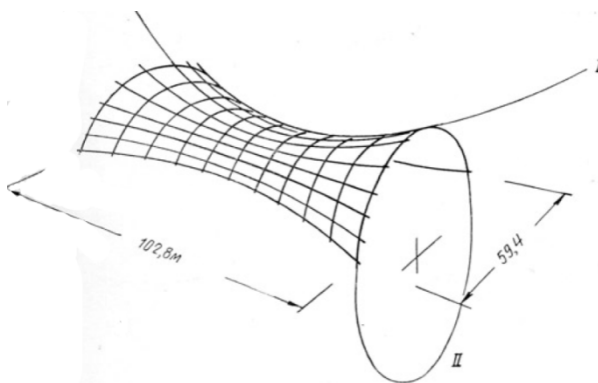
В выставочном зале Рио-Гранде-до-Сул использованы сетки двойной кривизны (рис. 66). Продольные несущие тросы подвешены к двум торцовым дугообразным аркам, работающим на сжатие. Тросы, принимая очертание цепи, огибают арки; концы их собраны в несколько пучков, которые прикрепляют к анкерам в грунте. Между опорными арками несущие тросы провисают не параллельно друг другу: они концентрически стягиваются поперечными натяжными тросами к средней оси сооружения. Все поперечные натяжные тросы образуют дуги. В целом сооружение приобретает форму *сегмента тела вращения*. В точках пересечения поперечных натяжных и продольных несущих тросов образуются составляющие усилий, имеющие касательное направление и заставляющие натяжной трос соскользнуть с несущего троса (рис. 66, в).

Натяжной трос, работающий в вертикальной плоскости, воздействует на несущий трос силой S . Данная сила делится на составляющую Q , которая перпендикулярна к несущему тросу, и на силу L , которая действует по оси троса. Под воздействием силы L натянутый трос стремится скользить. Этому препятствуют зажимные устройства. Эти зажимные устройства соединяют тросы во всех точках их пересечения. Этим путем была сохранена заранее заданная геометрическая форма, которая упрощает расчет системы и конструирование деталей.

а)



б)



в)

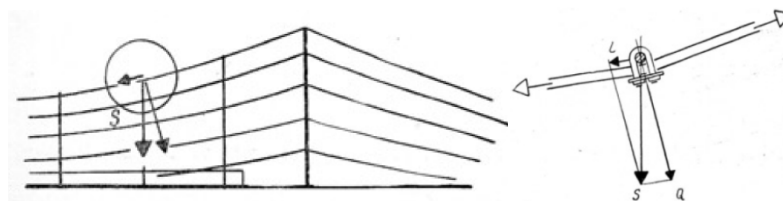


Рис. 66. Здание Рио-Гранде-до-Сул в Бразилии, состоящее из ряда тросов, натянутых в противоположных направлениях: а - общий вид; б - геометрия формы; в - разложение сил в местах пересечения тросов; I – линия провисающей цепи, II – круг

Вся несущая конструкция состоит из двух арок, установленных на торцах и работающих на сжатие, и тросов, работающих на растяжение.

Несущие тросы принимают форму провисающей цепи, натянутые – форму окружности. Вся конструкция состоит только из тросов, кроме двух сжатых арок на торцах здания.

Жесткая геометрическая форма зала в Рио-Гранде-до-Сул напоминает оболочку, имеющую форму тела вращения. Такая форма отличается недостаточной выразительностью. В отличие от оболочек в виде тел вращения, форма седлообразной поверхности, не являющейся отрезком тела вращения, обладает значительно большей выразительностью.

4.7 Складчатые и волнистые поверхности

Седловидная сетка из тросов может быть использована для устройства покрытия почти любой формы в плане.

Однако устройство покрытий протяженных сооружений одной седловидной сеткой затруднительно, возникает необходимость искать решения с применением смежного расположения таких покрытий. Ниже представлен вариант покрытия протяженного однопролетного здания.

Складчатые и волнистые сетки из тросов представляют собой особую группу и принципиально отличаются от рассмотренных выше систем сеток.

В них направление стягивающих тросов не перпендикулярно, а параллельно направлению несущих тросов, в данном случае они получили название продольных стягивающих тросов (рис. 67).

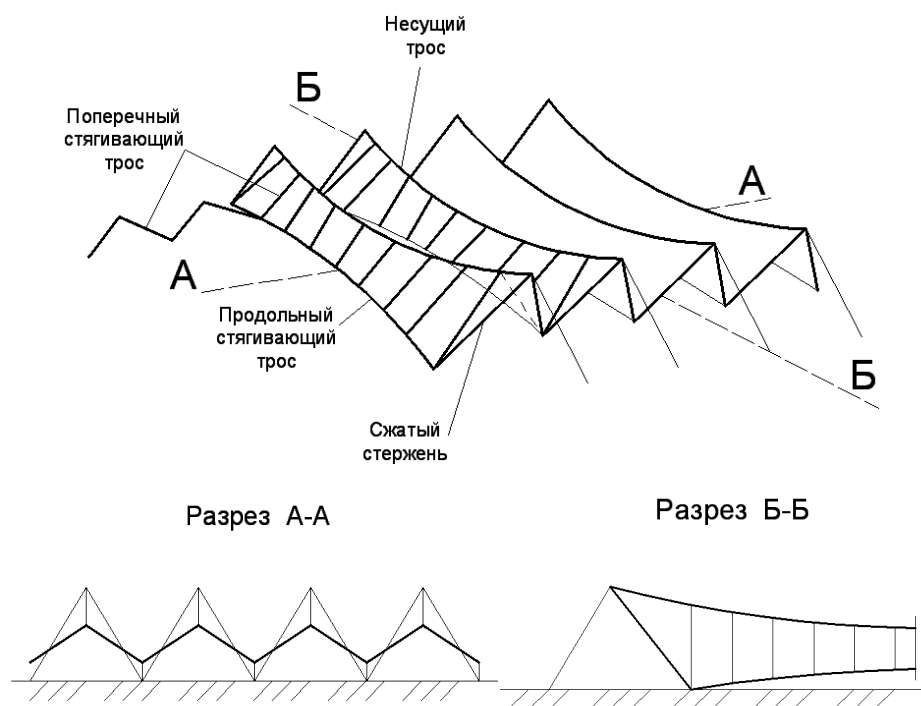


Рис. 67. Складчатая сетка из тросов простейшей системы для покрытия протяженного однопролетного здания зального типа

Стягивающие и несущие тросы последовательно натянуты один за другим. Несущий трос имеет выгиб книзу (провисание); стягивающий трос имеет выгиб кверху (вспарушенность).

Для обеспечения совместной работы несущих и стягивающих тросов и связи между ними, а также для передачи усилий предварительного натяжения несущим тросам и для образования поверхности собственно кровли в таких системах применяется еще один вид тросов – так называемые поперечные стягивающие тросы.

Профиль такого покрытия в разрезе, нормальном к направлению несущих тросов, получается складчатым или волнистым. В разрезе, параллельном направлению несущих и продольных стягивающих тросов, кровля имеет соответственно положительный или отрицательный выгиб.

Складчатое покрытие из сетки, показанное на рисунке 50, может быть с успехом применено для перекрытия протяженных большепролетных производственных зданий. Путем остекления одной из сторон складки можно получить шедовое покрытие.

Покрытие, выполненное по принципу складчатых или волнистых сеток, экономично и производит впечатление органичного решения.

Волнистое покрытие получается в тех случаях, когда сетка из тросов натянута между опорами – волнообразными полосами (рис. 68).

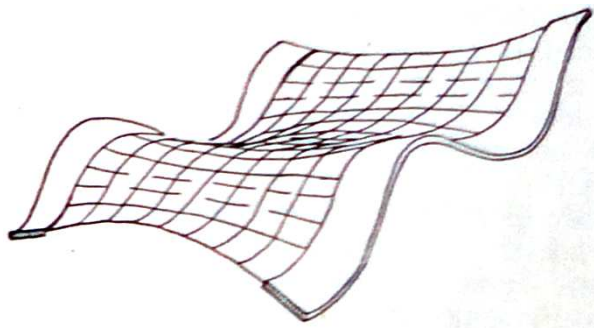


Рис. 68. Волнистая сетка из тросов, натянутая между волнистыми бетонными опорными полосами-балками

Нижний в левой части рисунка трос является продольным стягивающим тросом. Следующий второй слева трос также еще работает в качестве продольного стягивающего троса, однако уже в значительно меньшей степени. Два следующих троса (показанные на рисунке пунктирными линиями) имеют скорее значение заполнения, т. к. они не в состоянии выполнять назначение ни стягивающих, ни несущих тросов.

Несущими тросами, основными по существу несущими элементами покрытия, являются два последующих троса в гребне волны (не следует, однако, упускать из виду, что отрицательные ветровые нагрузки при легких покрытиях часто равны положительным нагрузкам, в связи с этим значения стягивающих тросов в таких конструкциях не уступает значению несущих тросов).

По поперечным стягивающим тросам на рисунке видно, что волны покрытия в средней его части значительно выше, чем у краев.

Во избежание слишком больших размеров общей конструктивной высоты покрытия высоту волны в средней части покрытия следует назначать меньшей. Однако не рекомендуется принимать ее слишком малой, т. к. близкий к прямой поперечный стягивающий трос не сможет обеспечить

передачи предварительного натяжения от стягивающих тросов к несущим тросам, в связи с чем покрытию не сможет быть придана необходимая общая жесткость.

Высоту волны в средней части покрытия следует назначать не менее $1/20 - 1/15$ длины волны.

Общий вид покрытия такой системы схематически показан на рис. 69.

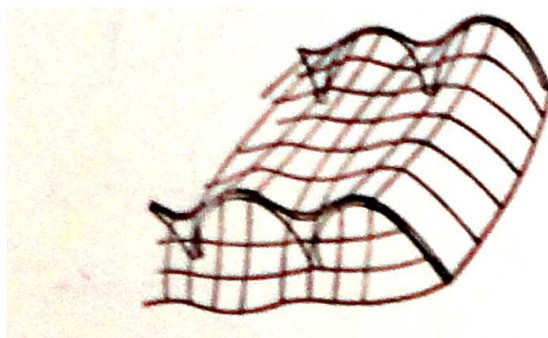


Рис. 69. Волнистая сетка с мягким очертанием, натянутая между двумя арками

В исключительных случаях допускается принимать высоту волны в средней части покрытия равной нулю, в результате чего на продольной оси здания образуется полоса плоского покрытия. В этом случае на продольной оси здания в перпендикулярном к несущим тросам направлении следует предусмотреть неразрезную балку жесткости.

На рисунке 70 показан способ применения системы одностороннего краевого троса-подбора [10], воспринимающего натяжение несущих и стягивающих тросов и который может быть стянут в кольцо, образуя здания круглые, кольцевые или в виде части кольца в плане, перекрытые целесообразным типом пространственных покрытий.

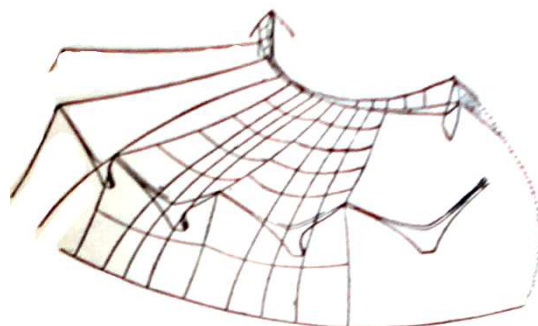


Рис. 70. Волнистая сетка над зданием, имеющим форму части кольца

Складчатые или волнистые покрытия из сетки могут быть отнесены к числу экономных конструктивных систем, обладающих большой архитектурной выразительностью.

4.8 Винтообразные поверхности

В основу винтообразных или спиральных покрытий положены винтовые поверхности. Винтовые поверхности относят к поверхностям отрицательной гауссовой кривизны, следовательно, они отвечают условиям, обеспечивающим несущую способность и предварительное напряжение покрытия. Винтовые покрытия описывает некоторая линия, вращающаяся с постоянной винтовой скоростью вокруг неподвижной оси и одновременно осуществляющая поступательное движение с постоянной скоростью вдоль оси. Поверхность, описываемая прямой линией, пересекающей ось вращения под прямым углом, является единственной среди винтовых поверхностей линейчатой минимальной поверхностью и называется прямым геликоидом. Висячих покрытиях могут применяться отдельные участки винтовых и других спироидальных, ротативных, гравитационных, минимальных поверхностей или комбинации этих участков. В зависимости от конкретных условий и расположения в пространстве по отношению к земле винтообразные покрытия могут быть разнообразной формы, образующей с основанием оригинальные объемы, отличающиеся необычностью архитектурных свойств и своеобразными художественно-декоративными качествами.

На рисунке 71 приведены некоторые виды винтовых поверхностей, которые можно использовать при проектировании сооружений с висячими покрытиями, солнцезащитных устройств, малых архитектурных форм и т.п.

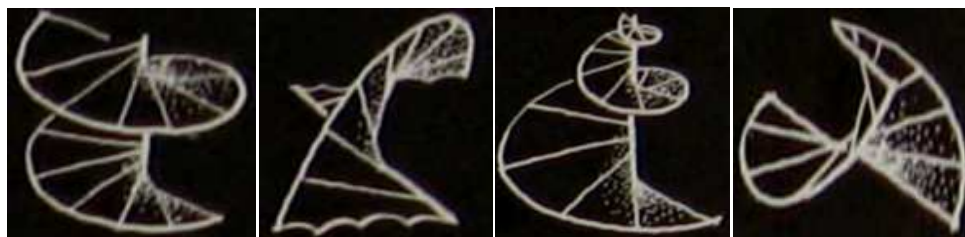


Рис. 71. Схемы некоторых форм, используемых для винтообразных покрытий

В спиральном покрытии обеспечивается естественный водосток, удобно решается освещение. Данное конструктивное решение придает зданию художественно выразительный внешний вид. Опорное кольцо такого покрытия можно выполнять в виде одной или нескольких восходящих спиралей (рис. 72, слева). Поскольку опорное кольцо получается разомкнутым, для обеспечения его нормальной работы необходимо предусматривать пилоны.

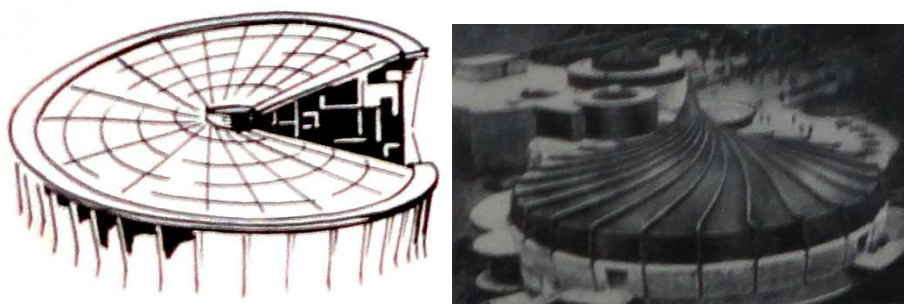


Рис. 72. Примеры спиральных покрытий

Этот тип покрытий менее всего изучен. Он используется для покрытий зданий специфического характера, где экзотичность формы может быть одним из факторов, определяющих целесообразность строительства.

К винтообразной можно отнести конструкцию покрытия над *малой спортивной ареной в Токио* (рис. 73, 74), выполненного под руководством архитектора Кензо Танге для Олимпийских игр 1964 г.



Рис. 73. Малая спортивная арена в Токио с висячим винтообразным покрытием (арх. Кензо Танге)

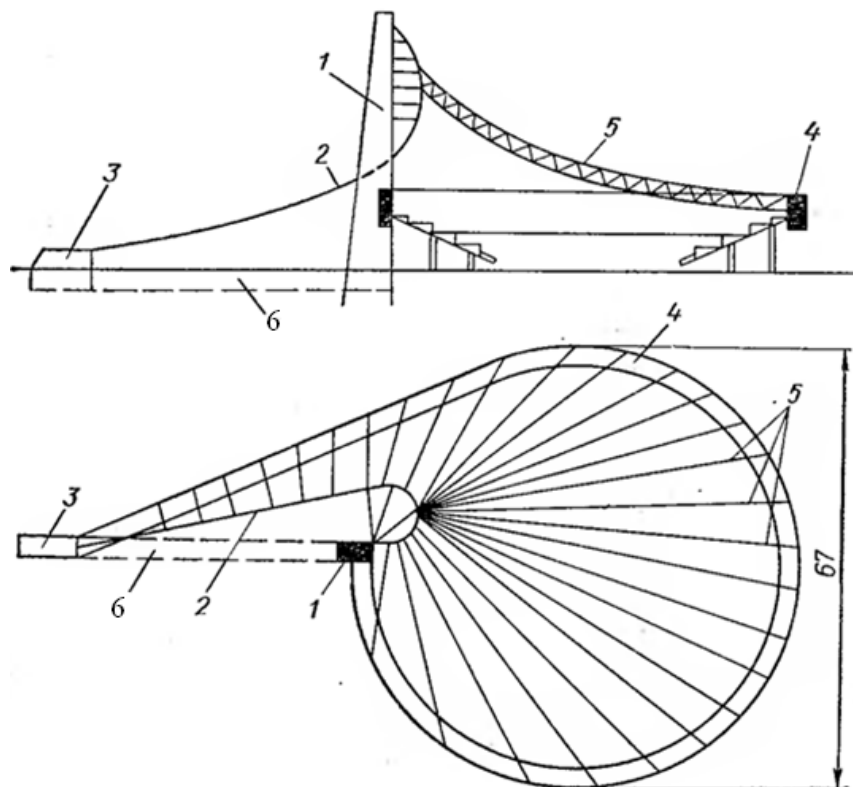


Рис. 74. Схема винтообразного покрытия малой спортивной арены Олимпийского комплекса в Токио: 1 - пилон; 2 - главная ванта; 3 - анкерный фундамент; 4 - контурные балки; 5 - вантовые фермы; 6 - распорная балка

5 Опорные конструкции висячих покрытий

Выбор типа опорной конструкции зависит в основном от способа восприятия горизонтальных усилий, передаваемых на опорную конструкцию покрытием. Кроме того, при проектировании опорной конструкции следует учитывать необходимость обеспечения жесткости покрытия, отвода дождевой воды и некоторые другие факторы.

Характерной особенностью пролетных конструкций висячих покрытий является большая величина горизонтальных сил (распора), передаваемая ими на опорные конструкции. Наиболее экономичное и эффективное восприятие распора является одной из самых важных и трудных проблем конструктивного решения висячих покрытий вообще и их опорных конструкций в частности. Горизонтальные силы воспринимаются опорной конструкцией покрытия и либо погашаются в уровне покрытия, либо должны быть переданы в грунт.

Наиболее просто эти задачи решаются для круглых и эллиптических в плане зданий (рис. 75, а). Наружное опорное кольцо позволяет погасить распор в пределах покрытия и создать внутренне уравновешенную систему с передачей на фундаменты только вертикальных усилий. В иных случаях на фундаменты дополнительно передаются также составляющие усилий от распора. Наружное опорное кольцо в основном работает на сжатие, поэтому его обычно делают из железобетона. Форма поперечного сечения кольца зависит от многих факторов: кольцо может быть сплошным или пустотелым, тавровым или двутавровым. Если кольцо жестко связано с колоннами или стенами, на которые оно опирается, то в расчете можно учесть совместную работу всех этих конструкций. Кольцо может быть сделано в виде горизонтальной стальной фермы. Внутренне растянутое кольцо выполняется из стали.

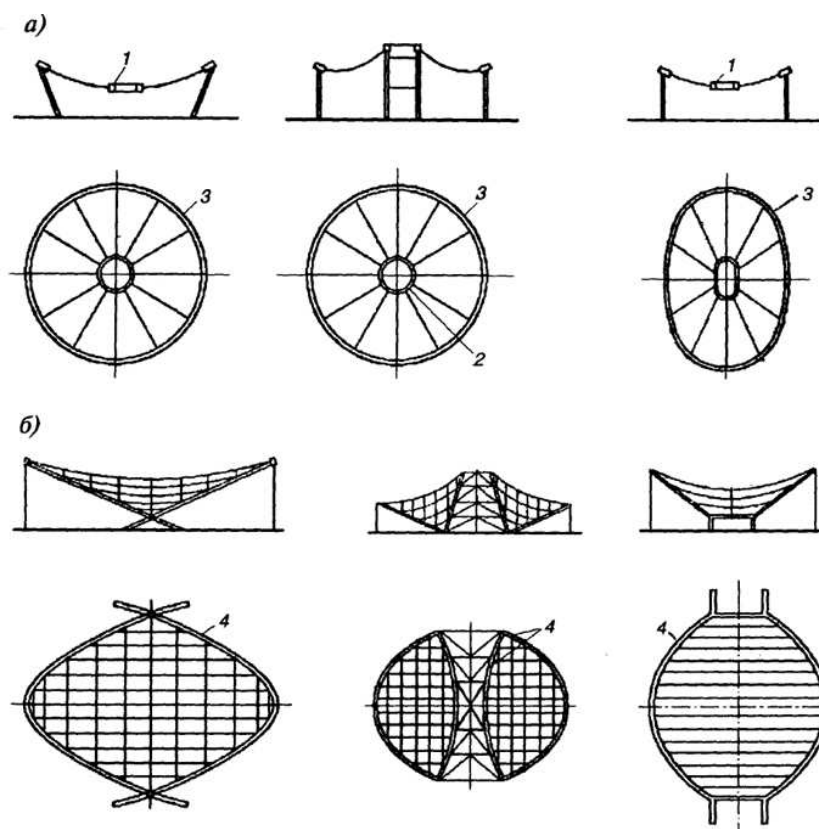
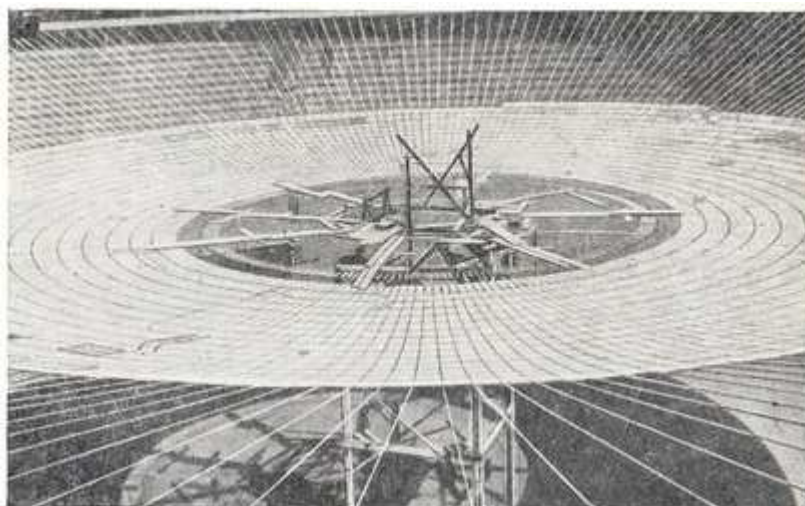


Рис. 75. Схемы круглых и арочных опорных конструкций:
 а - круглых; б - арочных; 1 - внутреннее кольцо; 2 - то же, опорное; 3 - наружное опорное кольцо; 4 - опорные арки

Примером такой конструкции является стадион в Монтевидео (рис. 76). Внешнее сжатое кольцо выполнено из железобетона, в нем заанкерованы 256 несущих вант диаметром 10 мм. Это кольцо шириной 200 см и высотой 45 см связано со стеной, выполненной в виде железобетонного цилиндра диаметром 94 м, высотой 25 м и толщиной 10 см. Внутреннее растягиваемое кольцо состоит из двух стальных кольцевых пластин толщиной 5 см, шириной 30 см и внутренним диаметром 5,7 м, соединенных друг с другом.

а)



б)

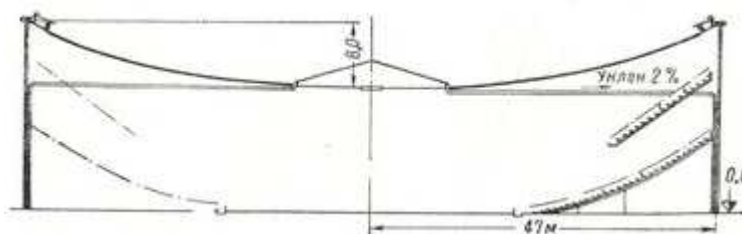


Рис. 76. Висячее покрытие над стадионом в Монтевидео:

а – вид сверху, б - схематический разрез стадиона

В перекрестных висячих покрытиях двойкой кривизны весьма удачным решением является опорная конструкция упомянутой выше Рэлей-арены или других систем в виде двух наклонных арок (рис. 76, б). Распор несущих нитей уравнивается собственным весом тяжелых железобетонных арок и подвешенных к ним стен. Сами арки работают на сжатие, что соответствует их конструктивной форме.

Интересна несимметричная конструкция висячего покрытия большой университетской аудитории в Брюсселе (рис. 77), которая имеет форму овала с осями: большой 48 м и малой 44 м. Висячее покрытие образовано 22 несущими вантами диаметром 33 мм и 24 натягающими вантами диаметром 21 мм. Ванты расположены на расстоянии 2 м друг от друга и крепятся к двум наклонным железобетонным аркам 4. Эти арки имеют поперечное сечение 120х60 см; угол между ними 120°. Главными опорами арок служат

две мощные треноги 2 из железобетона, которые соединены затяжкой 3 из предварительно напряженного железобетона сечением 45x75 см. Затяжка армирована восемью прядями по семь проволок диаметром 7 мм. Вспомогательными опорами являются вертикальные стойки по контуру зала.

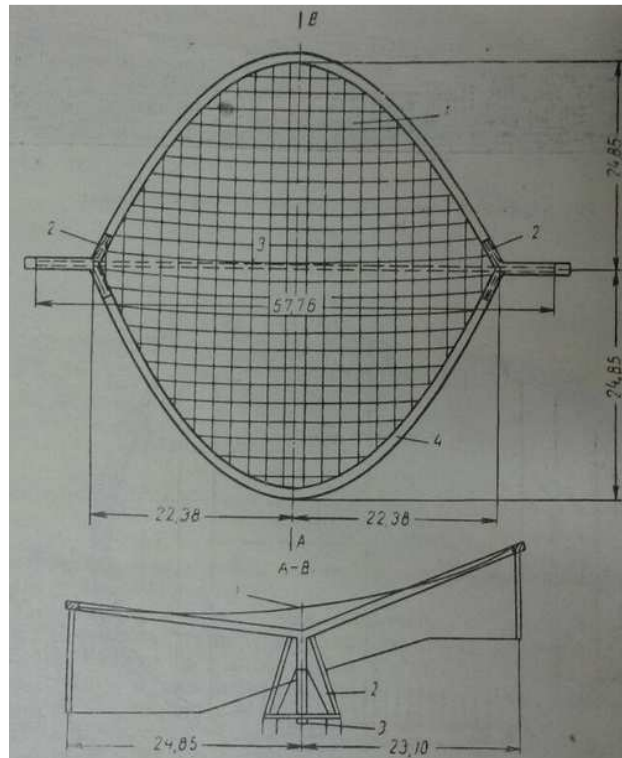


Рис. 77. Конструкция покрытия большой университетской аудитории в Брюсселе

Прямоугольный план здания не отвечает задаче восприятия распора, но поскольку подобная форма является главенствующей в архитектуре, ведется поиск, приспособленный к решению этой задачи. Рассмотрим основные схемы опорных конструкций на прямоугольном плане.

Распор может быть передан на фундаменты с помощью сжатых стоек и растянутых оттяжек, как показано на рис. 78.

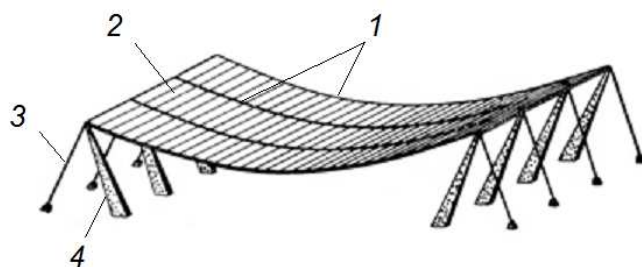


Рис. 78. Распор с помощью сжатых стоек и растянутых оттяжек

1 – ванты; 2 – элементы покрытия (кровля); 3 – оттяжки; 4 – опоры (стойки)

Большое количество оттяжек и анкерных фундаментов, закрепляющих их в грунте, делает такое решение неэффективным, поэтому в пределах одного шага колонн размещают несколько нитей и крепят их к специальным балкам опорного контура. Оттяжки устанавливают только в местах опирания балок на колонны. Кроме того, можно прикреплять несколько оттяжек к одному фундаменту (рис. 79, а), что облегчает производство работ, хотя и связано с увеличением длины оттяжек.

Распор может быть передан через балки 3 (рис. 79, б), расположенные в плоскости покрытия, на торцевые диафрагмы в виде сплошных стены или контрфорсов. В этом случае промежуточные стойки 2 небольшой жесткости воспринимают лишь часть вертикальных составляющих усилий. Распор на диафрагмы можно передать через криволинейные стены (рис. 79, в), которые выполняют либо сплошными, либо в виде рам с рядом стоек и криволинейным ригелем.

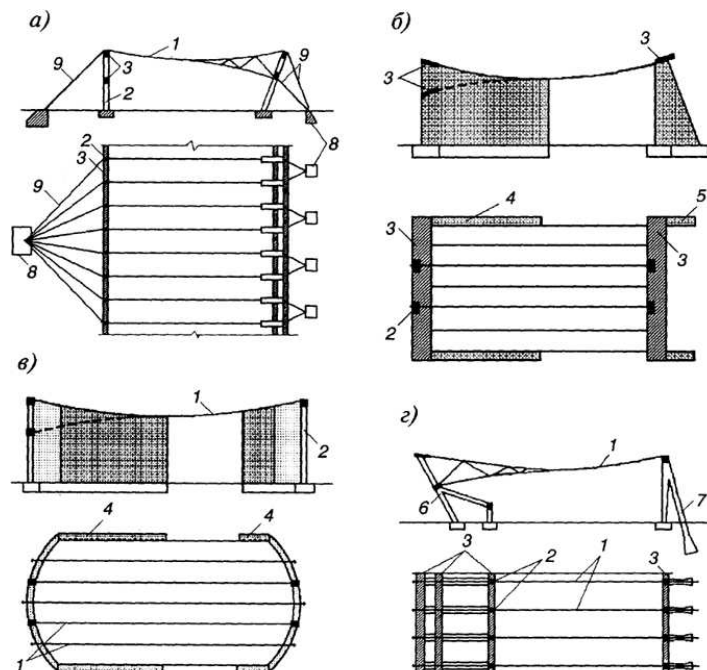


Рис. 79. Опорные конструкции:

а - с передачей распора на оттяжки; б - то же, на торцевые диафрагмы; в - то же, на криволинейные стены; г - то же, на рамы в плоскостях тросов; 1 - тросы (тросовые фермы); 2 - колонны; 3 - жесткие балки; 4 - торцевые диафрагмы; 5 - контрфорсы; 6 - поперечные рамы; 7 - растянутые подкосы; 8 - анкерные фундаменты; 9 - оттяжки

Усилия распора можно передать на междуэтажные перекрытия и далее на ригели рам, либо непосредственно на жесткие рамы (рис. 79, г). Применение таких рам экономически оправдано, если они функционально необходимы в здании, например, для устройства пристроек, трибун и т.п.

Известны примеры возведения висячих систем с опорным контуром в виде квадрата, шестиугольника (рис. 80, а, б). Безызгибная работа таких конструкций может быть обеспечена при передаче распора в углы опорного контура. Если это не удастся сделать непосредственно, то прибегают к использованию дополнительной конструкции - подбора, закрепленного в углах опорного контура (рис. 80, в, г). Подбор расположен в плоскости покрытия, он может быть выполнен из тросов, полосовой или профильной стали и работает на растяжение от усилий распора в прикрепленных к нему нитях.

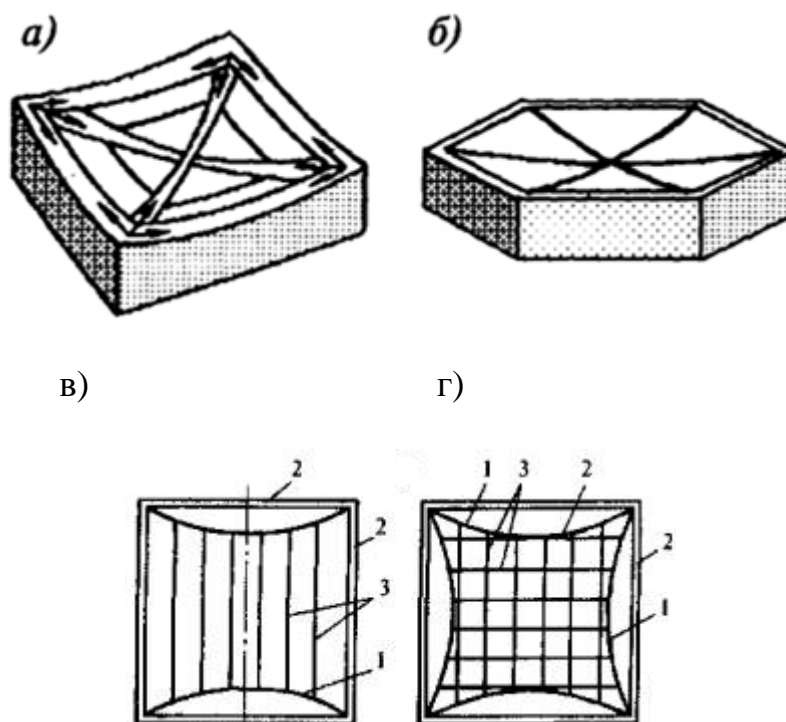


Рис. 80. Безызгибные опорные контуры:

а - квадратный; б - шестиугольный; в - с тросами-подборами
1 - тросы-подборы; 2 - сжатые элементы опорного контура; 3 - ванты

Заключение

Успешное развитие архитектуры в условиях научно-технического прогресса неразрывно связано с использованием передовых достижений в различных областях науки и техники и, прежде всего, с применением прогрессивных большепролетных конструктивных систем и новых эффективных строительных материалов.

Среди современных строительных конструкций наиболее рациональными для сооружений среднего пролета и единственно возможными для большепролетных являются пространственные системы покрытий. Они широко используются в общественных зданиях. Такие системы позволяют без существенного увеличения трудозатрат на изготовление и расхода материалов по сравнению с плоскостными конструкциями освободить перекрываемое пространство от промежуточных опор. При этом обеспечивается универсальность использования здания, более интенсивная его эксплуатация, замедляется его моральное старение, создаются необходимые условия для приспособления его к новым функционально-технологическим процессам.

Из пространственных конструкций выделяются висячие покрытия. Они экономичны, наименее материалоемки, обладают богатыми объемно-пластическими возможностями и художественно-декоративными качествами.

Достоинства этих систем, позволяющих весьма экономично и без применения промежуточных опор решать задачу перекрытия площадей и к тому же не требующих сложных устройств в процессе возведения, заставляют признать их заслуживающими большого внимания инженеров-строителей. Снимаются конструктивные ограничения на организацию гибкой планировки здания, что 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. Этот вид покрытия может быть весьма успешно

применен как для промышленных, так и для разнообразных общественных сооружений. Характерно, что достоинства висячих покрытий выявляются ярче с увеличением размеров перекрываемого пространства.

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

Библиографический список

1. Бюттнер, О. Сооружение – несущая конструкция – несущая структура: Анализ живой природы и градообразующей среды : пер. с нем. / О. Бюттнер, Э. Хампе. – Москва : Стройиздат, 1983. – 340 с. : ил.
2. Гайдаров, Ю. В. Вантовые конструкции : учебник / Ю. В. Гайдаров. – Ленинград : Ин-т инженеров железнодорож. транспорта, 1972. – 70 с.
3. Грефе, Р. В. Г. Шухов (1853-1939). Искусство конструкции : пер. с нем. / Р. Грефе, М. М. Гаппоева, О. Перчи. – Москва : Мир, 1995. – 192 с. : ил.
4. Захарова, А. В. Архитектура гражданских и промышленных зданий. Гражданские здания : учебник для вузов по специальности ПГС / под общ. ред. А. В. Захарова, Т. Г. Маклакова. – Москва : Стройиздат, 1993. – 509 с.
5. Кирсанов, Н. М. Висячие покрытия производственных зданий / Н. М. Кирсанов. – Москва : Стройиздат, 1990. – 128 с. : ил.
6. Кирсанов, Н. М. Висячие и вантовые конструкции : учеб. пособие для вузов / Н. М. Кирсанов. – Москва : Стройиздат, 1981. – 158 с. : ил.
7. Кирсанов, Н. М. Альбом конструкций висячих покрытий / Н. М. Кирсанов. – Москва : Высш. шк., 1965. – 158 с.
8. Людковский, И. Г. Современное состояние и перспективы применения висячих покрытий / И. Г. Людковский // Висячие покрытия : тр. совещания по исслед. и внедрению висячих покрытий / под ред. И. М. Рабиновича. – Москва, 1962.
9. Предтеченский, В. М. Архитектура гражданских и промышленных зданий : учебник для вузов. В 2 т. Т. 2 / В. М. Предтеченский. – Москва : Стройиздат, 1976. – 215 с.
10. Рабинович, И. М. Висячие покрытия : тр. совещания по исслед. и внедрению висячих покрытий / И. М. Рабинович. – Москва : Гос. изд-во лит. по стр-ву, архитектуре и строит. материалам, 1962. – 247 с.

11. Сobotка, З. Висячие покрытия : пер. с чеш. / З. Сobotка. – Москва : Стройиздат, 1964. – 151 с.
12. Трофимович, В. В. Проектирование предварительно-напряженных вантовых систем / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков. – Киев : Будівельник, 1970. – 140 с. : ил.
13. Туполев, М. С. Конструкции гражданских зданий : учебник для вузов по специальности «Архитектура» / М. С. Туполев. – Москва : Архитектура-С, 2006. – 240 с. : ил.
14. Шубин, Л. Ф. Архитектура гражданских и промышленных зданий : учеб. пособие для вузов. В 5 т. Т. 5 / Л. Ф. Шубин, И. Л. Шубин. – Москва : БАСТЕТ, 2010. – 440 с. : ил.

Агеева Елена Юрьевна
Тишков Владимир Александрович
Филимонова Александра Евгеньевна

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВИСЯЧИХ ПОКРЫТИЙ В
ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ

Учебное пособие

Редактор
Сидоренко П.В.

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