

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ РЕБРИСТО-КОЛЬЦЕВЫЕ И СЕТЧАТО-СТЕРЖНЕВЫЕ ОБОЛОЧКИ XIX – ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЫ XX-го ВЕКОВ

С.Н. КРИВОШАПКО, *д-р техн. наук, профессор,*
Российский университет дружбы народов,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

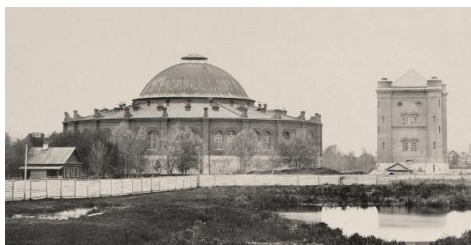
С давних пор железо употреблялось в качестве усиливающего элемента в каменной кладке. Но оно превратилось в строительный материал лишь после появления современной металлургии. Кардинальные изменения в судьбе металлических конструкций последовали в начале XIX века, когда вместо каменных и кирпичных столбов стали использовать чугунные. В статье описываются жесткие металлические структуры оболочечного типа, начиная с купола Исаакиевского собора в Санкт-Петербурге и заканчивая наиболее значимыми объектами, возведенными до 1967 года.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлические ребристо-кольцевые купола, сетчато-стержневые оболочки, стальные резервуары.

Первые оболочечные конструкции с применением металла – купола, своды, навесы – появились в средние века и были распространены по всему миру. Впервые металл был применен в виде затяжек и крепов для каменной кладки. Первой конструкцией в России, где использовались затяжки из кованого железа, является Успенский собор во Владимире (1158 г.). Покровский собор в Москве (1560 г.) – первое сооружение, в котором использовались конструкции из стержней, работающих на растяжение, сжатие и изгиб. Здесь затяжки, укрепленные подкосами, поддерживают пол и потолок коридора в соборе. Пространственные купола трапезной Троице-Сергиевой лавры в Сергиевом Посаде (1696), Большого Кремлевского Дворца в Москве (1640), колокольни Ивана Великого (1603 г.), Казанского собора в Петербурге пролетом 15 м (1805 г.) уже содержат стержневые конструкции из кованных брусков, соединенных в замке. Покрытие крыльца Невьянской башни на Урале (1725 г.) считается первой чугунной конструкций в России. Однако стержневые пространственные конструкции стали строиться значительно позже, в самом конце XIX-го века. По-видимому, это связано со сложностью устройства узловых соединений и, во-вторых, отсутствовала потребность в возведении этих структур, в основном, башенного или мачтового типа.



Рис. 1. Купол Исаакиевского собора (Санкт-Петербург)



а) 1850-е годы (фото И.К. Гофферта), б) наше время (фото Э. Кудрявицкого)

Рис. 2. Круговое депо архитектора Константина Тона

Купол Исаакиевского собора в Санкт-Петербурге (1818-1858гг.) состоит из трех взаимосвязанных частей: внутренней сферической, средней конической и

наружной параболической (рис. 1). Первые две образованы каждая 36-ю чугунными фермами. Обе части соединены друг с другом мощными болтами. Внешний параболоид вращения имеет чугунное опорное кольцо диаметром 25,8 м. Купол состоит из меридиональных железных ребер, покрытых медными листами, поверхность которых позолочена. Хрустальный дворец в Лондоне, который, к сожалению, сгорел, был сооружен в 1851 г. из кованого железа и стекла. Из тех же материалов была построена Галерея машин на Парижской выставке 1889 г. (арх. А. Дюбер). Наряду с ангарами для дирижаблей Э. Фрейсине (1916 г.) эти здания заложили основы новой архитектуры. Менее известно круговое депо Николаевской железной дороги (арх. К. Тон) с металлическим куполом (рис. 2, а), построенное в 1847-1851 годах (Москва, около Ленинградского вокзала). Купол до настоящего времени не сохранился (рис. 2, б).



Рис. 3. Эйфелева башня, Париж, Франция



Рис. 4. Фрагмент Эйфелевой башни (на малом карнизе написаны имена ученых – механиков: Seguin, Tresca, Lagrange, Laplace, Nevier и др.)

Считается, что первая стержневая пространственная мачтовая структура была возведена в Париже инженером-строителем Г. Эйфелем в представительских целях для Всемирной выставки 1889 г. в Париже (рис. 3; 4). Эта конструкция вызвала массу споров о ее полезности, эстетичности и выразительности. Но как показало время, Г. Эйфель был прав, и теперь Эйфелева башня стала символом города и невозможно представить Париж без этого строения. Кроме этой башни Г. Эйфель (Gustave Eiffel, 1832-1923) построил несколько мостов, виадуков и других металлических конструкций. Он - автор каркаса Статуи Свободы для Нью-Йорка (1886). С 1900 г. занимался, в основном, исследованиями по аэродинамике.



Рис. 5. Водонапорная башня В.Г. Шухова в форме однополостного гиперboloида вращения (первая в мире гиперболическая конструкция на Всероссийской выставке в Нижнем Новгороде, 1896)

Родоначальником строительства стержневых пространственных систем можно смело назвать В.Г. Шухова, выдающегося русского инженера. Он, первый, создал, запроектировал и построил стержневые конструкции в форме однополостного гиперboloида вращения. В самом конце XIX века В.Г. Шухов (1853-1939) построил первую в мире решетчатую гиперболическую башню (рис. 5), а затем оболочку двойной кривизны (рис. 6). Привилегия Шухова № 1856 «Ажурная башня»

имела приоритет от 1.01.1896 г. С 1906 г. на военных кораблях США стали возводиться гиперboloидные башни из стальных труб, указанных в шуховской привилегии, но они получили название американских башен. На российских броненосцах такие башни начали возводить с 1909 г.

К первым металлическим оболочкам можно отнести своды В.Г. Шухова, например, дебаркадер Киевского (Брян-



Рис. 6. Сетчатые стальные оболочки положительной гауссовой кривизны, г. Выкса, 1897 (металлургический завод)



Рис. 7. Использование плоских металлических ферм в дебаркадере Киевского вокзала, 1912-1917

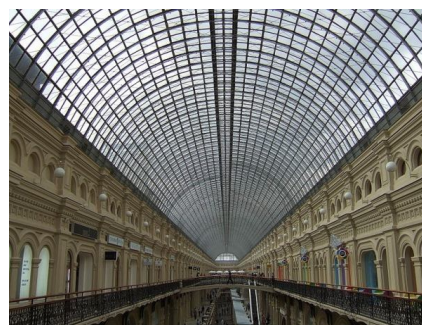


Рис. 8. Безарочный свод В.Г. Шухова

ского) вокзала (1912-1917 г., рис. 7), покрытие ГМИИ им. Пушкина (1912 г.) и др. (рис. 8).

Интересные инженерные разработки практически сразу находили применение в военных целях, как это произошло с гиперболическими башнями В.Г. Шухова, использовавшимися на военных кораблях. Во время первой Мировой войны нашли применение сферические толстостенные



Рис. 9. Стальной купол над артиллерийской позицией (1913 г.)



Рис. 10. Шаболовская радио-телебашня

стальные купола (рис. 9) для покрытий подземных фортов. Практически все они были разрушены тяжелой немецкой артиллерией во время боевых действий.

Из более 200 построенных Шуховым опор линий электропередач, в России осталось менее 10, высотных многосекционных всего две. В 1989 году 20-ти и 60-то метровые опоры были демонтированы и оставлены только 128-ми метровые как наследие гениального русского инженера-учёного. Одна из его башен – Шаболовская радио-телебашня (1919-1922 годы, рис. 10) – считается шедевром авангардной архитектуры. Его стержневые гиперboloиды вращения просматриваются в формах многочисленных современных стержневых структур. Методика конструирования и возведения безарочных сводов, предложенная В.Г. Шуховым (рис. 8), используется до настоящего времени. В.Г. Шухов старался создавать «наивыгоднейшие проекты» [1]. А

это значит – функциональное совершенство, оптимальная схема, снижение материальных и трудовых затрат.

Некоторые исследователи сетчато-стержневых оболочек отдают первенство в строительстве стальных сетчатых конструкций Самуэлю Катлеру (Samuel Cutler), построившему стальные сетчатые оболочки газгольдеров в Восточном Гринвиче (Blackwall Line) в 1886 – 1888 годах (рис. 11) на 8 лет раньше В.Г. Шухова. Каттлер начал строить такие оболочки с 1878 года. Однако можно напомнить слова профессора МИТУ П.К. Худякова (1858-1935): «... новые покрытия инженера Шухова возбудили к себе захватывающий интерес, особенно потому, что основная идея устройства является вполне оригинальной и не могла быть позаимствована изобретателем ни в западноевропейских, ни в американских образцах...».



Рис. 11. Газгольдеры в Восточном Гринвиче (1886-1888)

Сетчатая сводчатая конструкция многократно исполнена и запатентована П. Нерви, хотя впервые патент № 1896 выдан Шухову на «Сетчатые сводообразные покрытия» еще 12.03.1899 г., а заявлен 11.01.1896 г. Свои идеи применительно к стальным конструкциям П.Л. Нерви использовал в своих ранних проектах ангаров и временных выставочных помещений в Германии. В 1935 г. П.

Нерви построил шесть ангаров покрытых сеткой из ребер сквозной конструкции. Сборные ребра фермочки длиной 3 и высотой 0,9 м готовили на стройплощадке и соединяли в сетку сваркой арматурных выпусков; кровлей служили волнистые асбестоцементные листы. Для ангара в Орбетелло (рис. 12) П.Л. Нерви использовал свои идеи, воплощенные в своих ранних работах из стали и дерева для ангаров и временных выставочных помещений в Германии. Позже построены сетчатые оболочки П. Нерви над одним из залов Туринской выставки в 1949-1950 гг.; над соевым складом в Тордоне, 1951 г.; над овальным залом для танцев в Чинчиано, 1952-1953 гг. В Чинчиано, ребра сетчатого купола забетонированы в армоцементных опалубочных элементах, оставленных в качестве отделочного слоя. В публикациях, посвященных сетчатым конструкциям П. Нерви, нигде ни упоминается В. Г. Шухов! П.Л. Нерви неоднократно подчеркивал, что интуиция архитектора-проектировщика стоит на первом месте в процессе создания нового образа сооружения. Он писал: «Концепция создания новой структурной формы есть созидательное действие, только частично основанное на научных данных» [2].

В число инженеров, первыми обратившими внимание на пространственные стержневые конструкции, должен быть включен также Ал. Гр. Белл, который получил несколько патентов на пространственные стержневые структуры.

Август Фёпль, опубликовавший свой научный труд «Theorie des Fachwerks», первым предложил методику расчета пространственных стержневых систем в 1880. Эта работа использовалась Г. Эйфелем при проектировании его башни в 1889 г.

Параболический свод был использован архитекторами В.С. Андреевым и И.Г. Тарановым при проектировании павильона «Механизация» на ВСХВ (Москва, 1939 г.). Павильон представлял собой гигантский параболический свод, перекрывающий широкую аллею (рис. 13). Не все архитекторы отнеслись по-



Рис. 12. Ангар в Орбетелло

ложительно к идее авторов проекта. Например, Н. Уманский отмечал: «Принятая в проекте четкая современная конструкция легкого металлического перекрытия параболической формы требует, естественно, особого подхода к использованию различных изобразительных средств. Поэтому примененная для декорации внутренней поверхности эллинга скульптура находится в конфликте с основной идеей сооружения и не соответствует архитектурному замыслу. От

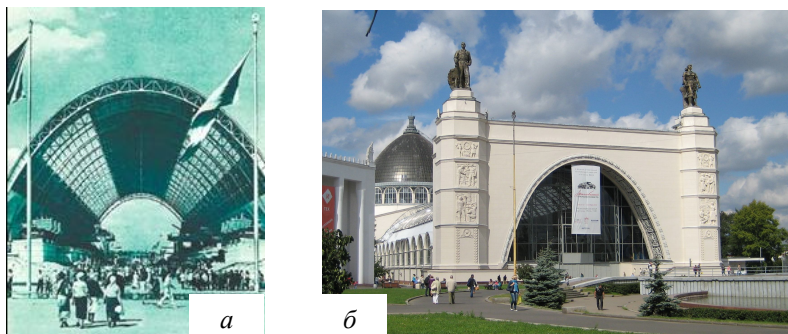


Рис. 13

а) павильон "Механизация" на ВСХВ в Москве (1939 г.);
б) павильон в наше время (2014 г.)

введения венчающих здание украшений можно было безболезненно отказаться. Прекрасно найденная кривая арки создает достаточно четкий и убедительный силуэт и не нуждается ни в каких декоративных придатках».

Сторонники возведения большепролетных пространственных структур из металла считают, что «металл есть средство архитектурного освоения пространства и это отражается в многовековой традиции его применения во всех областях зодчества». Преимущества металлических конструкций заключаются в их сборности, легкости, простоте монтажа, в возможности транспортирования элементов заводского изготовления на большие расстояния к месту строительства. Заводское изготовление металлоконструкций позволяет оперировать минимальными допусками отклонений от проектных величин и достигать точной проектной формы оболочки. Но были и другие мнения, например, Б.В. Горенштейн [3] полагал, что «стальные или даже алюминиевые конструкции могут оказаться целесообразнее только в труднодоступных для транспорта районах». Свое предположение высказывал и известнейший советский инженер Н.В. Никитин: «Настало время тонких железобетонных оболочек, а стальные ажурные конструкции остались в прошлом» [4].

Однако, несмотря на разные мнения о месте стальных большепролетных пространственных конструкций в гражданских и промышленных зданиях и сооружениях проектирование и строительство металлических оболочек продолжалось.

В 1940-х и в 1950-х годах, благодаря Б. Фуллеру и Н. Фостеру, стальные сетчатые оболочки стали одним из средств формообразования авангардных зданий. Их стали называть *геодезическими куполами*. В 1949 году Б. Фуллер возвел свой первый геодезический купол, который выдерживал свой собственный вес, однако для практических целей не применялся. Это было сооружение диаметром 4,3 м в форме экосаедрa из алюминиевых авиационных трубок с винил-пластиковым покрытием. Правда, первый геодезический купол был создан Вальтером Бауерсфельдом (Dr. Walther Bauersfeld) за 30 лет до этого, однако первые патенты США на геодезические купола были выданы Б. Фуллеру.

Именно Б. Фуллер широко популяризировал их, благодаря чему во всем мире были построены тысячи геодезических куполов этого типа.



Рис. 14. Спортивное сооружение в г. Сван (велодром)

Историческое значение для г. Сван (Swan) имеет полностью металлическое здание в форме параболического цилиндра, которое используется как велодром (рис. 14). Последний осмотр в 1995 году показал, что сооружение может эксплуатироваться. В том же городе имеется еще одно аналогичное сооружение, которое используется для хранения зерна.

В г. Атланте (США, 1957 г.) построен спортивный зал, круглый в плане, перекрытый ребристым куполом эллипсоидного очертания, диаметром 82,3 м со стрелой подъема 15,24 м (рис. 15). Основной несущей конструкцией покрытия служат

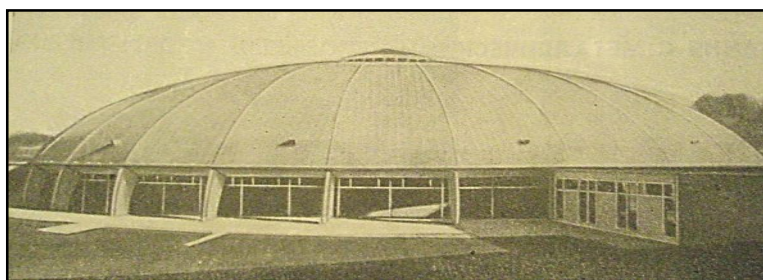


Рис. 15. Спортзал в г. Атланта (США)

32 стальные полуарки эллиптического очертания, установленные на уровне земли и шарнирно опертые на верхний обрез фундаментов. Верхние концы полуарок стыкуются над центром здания при помощи стального двутаврового кольца диаметром 3,05 м. Центральное кольцо опиралось на монтажную стойку. И.Г. Гохарь-Хармандарян [5] считает, что «голый схематизм и отсутствие художественной прорисовки конструктивной формы спортивного зала в г. Атланта придают ему весьма унылый вид».

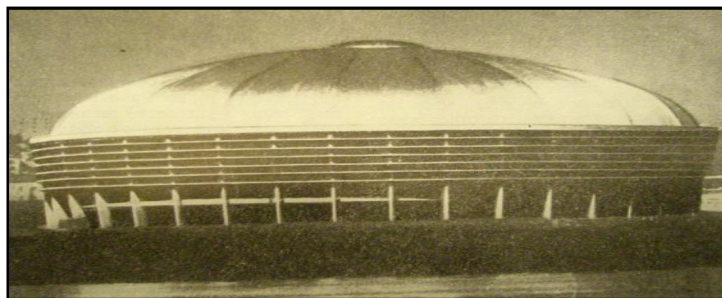
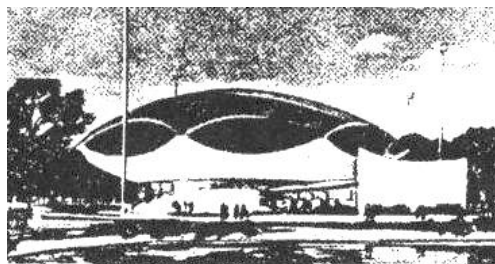


Рис. 16. Крытый стадион в парке в г. Сан-Паулу (Бразилия)

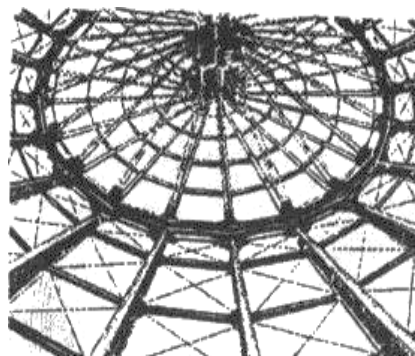
Купол крытого стадиона в парке г. Сан-Паулу (Бразилия, 1958 г.) имеет форму эллипсоида вращения с диаметром в основании 80 м. Стадион рассчитан на 20000 зрителей (рис. 16). Конструкция купольного покрытия выполнена в металле в виде стальных решетчатых полуарок эллиптического очертания, опирающихся вверху на сжатое металлическое решетчатое кольцо. Центральное кольцо устанавливалось на специально возведенную вертикальную стальную решетчатую опору. Нижние концы полуарок шарнирно опираются на оголовки вертикальных опор. Распор купола воспринимается железобетонным кольцом. Шесть железобетонных колец солнцезащитного устройства опоясывают по

внешнему периметру наклонные стойки купола. Кольца солнцезащитного устройства имеют меньшую толщину, чем верхнее кольцо. Это показывает их второстепенную роль в работе конструкции по сравнению с верхним кольцом.



a – общий вид павильона;

Рис. 17. Павильон компании по страхованию путешественников на Международной выставке в Нью-Йорке (США)



б – каркас павильона

Общий вид здания павильона компании по страхованию путешественников на Международной выставке в Нью-Йорке показан на рис. 17, *a*. Стальная пространственная напряженная конструкция состоит из 24 сборных стальных ребер по форме близких к эллипсу. Верхние концы ребер соединены двухпоясной вантовой системой. Для обеспечения устойчивости ребра, шарнирно закрепленного внизу и вверху, необходима горизонтальная сила, приложенная к его верхнему краю, которая создается предварительно напряженным покрытием, еще одна сила создается канатами, обмотанными по кольцу вокруг ребер. Сначала были установлены на наружных временных опорах 24 стальных сборных ребра. Затем к верхним концам этих ребер были прикреплены канаты предварительно напрягаемого покрытия. На этой стадии работ два внутренних кольца, показанные на рис. 17, *б*, лежали одно на другом, опираясь на легкие подмости, установленные в центре здания. Затем два внутренних кольца раздвигались, что вызывало натяжение канатов. При этом все ребра поднимались с их наружных временных опор. Полностью смонтированный каркас показан на рис. 17, *б*. Такое решение обеспечило исключительно малые размеры поперечных сечений конструктивных элементов. Для сооружения всего объекта потребовалось три недели. Расход строительной стали на это предварительно напряженное сооружение составил всего $43,9 \text{ кг/м}^2$.

Первый в мире крытый стадион с искусственным климатом был построен в Хьюстоне (США) и принят в эксплуатацию 9 апреля 1969 года. Строительство начато в 1962 году. Здание, круглое в плане, диаметром 216 м, диаметр покрытия стадиона равен 193 м (рис. 18). В вершине есть аэрационный фонарь диаметром 12 м. Самая высокая точка стадиона находится на высоте более 60 м. Архитекторы – Hermon Lloyd & W.B. Morgan и Wilson, Morris, Crain & Anderson. Стальной каркас ребристо-кольцевого купола состоит из 12 главных радиальных арок, опорного кольца, опирающегося на 72 стальные колонны, верхнего кольца и пересекающихся промежуточных ребер, параллельных главным. Все элементы стального каркаса выполнены в виде сварных ферм высотой 1,5 м. По ребрам купола уложены кольцевые прогоны с шагом 2,4 м, на которые уложены железобетонные панели толщиной 8 см с древесноволокни-



Рис. 18. Крытый стадион (Houston Astrodome) в Хьюстоне (США)

стым заполнителем. Кровля наносилась набрызгом на панели настила. Нижняя часть купола – глухая, выше – с проемами размером $1 \times 2,1$ м, закрытыми акриловыми прозрачными панелями в 2 слоя, которые затем были покрашены, т.к. дневной свет мешал спортсменам и зрителям. Расход стали на купол составил 96 кг/м^2 горизонтальной проекции.

Л.Л. Павлов [6] утверждает, что «опыт эксплуатации крытых спортивно-зрелищных сооружений показывает, что, несмотря на превышение стоимости в несколько раз по сравнению с аналогичными открытыми сооружениями, они при правильной планировке и эксплуатации являются рентабельными в отличие от открытых. В частности, это связано с круглогодичностью и всепогодностью их использования».

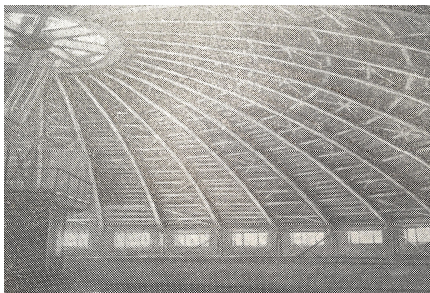


Рис. 19. Купол над производственным корпусом Ковдорского горно-обогатительного комбината

На рис. 19 показано купольное покрытие над производственным корпусом Ковдорского горно-обогатительного комбината. Ребристо-кольцевой купол диаметром 54 м со стрелой подъема 8,2 м состоит из 32 радиальных ребер сварного двутаврового сечения, соединенных между собой верхним и нижним опорными кольцами, шестью промежуточными кольцами, образующими совместно жесткую пространственную систему. После установки и выверки, очерченных по шаровой поверхности ребер, по ним раскатали стальной лист толщиной 3 мм, работающий между ребрами как мембрана. Мембрана прикреплена к верхнему поясу ребер высокопрочными болтами.

Рассмотренные выше здания с металлическими сводами и купольными покрытиями представляют собой *ребристо-кольцевые структуры с металлической кровлей*.

Рассмотренные выше здания с металлическими сводами и купольными покрытиями представляют собой *ребристо-кольцевые структуры с металлической кровлей*.

В мировой практике применения *сетчато-стержневых структур* насчитывается более 130 различных систем, отличающихся, прежде всего, конструкцией узла сопряжения стержней. Именно в узле сопряжения сосредоточены главные особенности технологии изготовления и сборки конструкции, определяющие отличия одной системы от других. Одной из первых нашла применение в строительстве система немецкой фирмы "Меро" (1942 г.), предложившей пространственно-стержневые сборно-разборные каркасы кристаллического строения для зданий военного назначения. Позднее такие конструкции нашли применение и в мирном строительстве.

Применение стальных сетчатых куполов в обозначенный период времени проиллюстрируем на нескольких примерах.



Рис. 20. Выставочный павильон на ярмарке в Брно (ЧССР), 1959 год



Рис. 21. Три системы трубчатых стержней в трех уровнях выставочного павильона в Брно

Центральный зал выставочного павильона на ярмарке в г. Брно (Чехословакия) перекрыт сферическим металлическим куполом с диаметром в основании 93,5 м (рис. 20). Трехслойная система стержней образована двумя системами окружностей, симметричных относительно меридиана, а третья система окружностей, совпадает с параллелями, параллельна плоскости пола и расположена на верхнем уровне (рис. 21). Все системы стержней расположены в разных уровнях и накладываются одна на другую, т.е. нигде не пересекаются. Трубы применялись четырех диаметров 60, 70, 81 и 102 мм. Диаметр труб уменьшался к вершине купола. Эта трехслойная стержневая система предложена чешским инженером Ф. Ледерером.

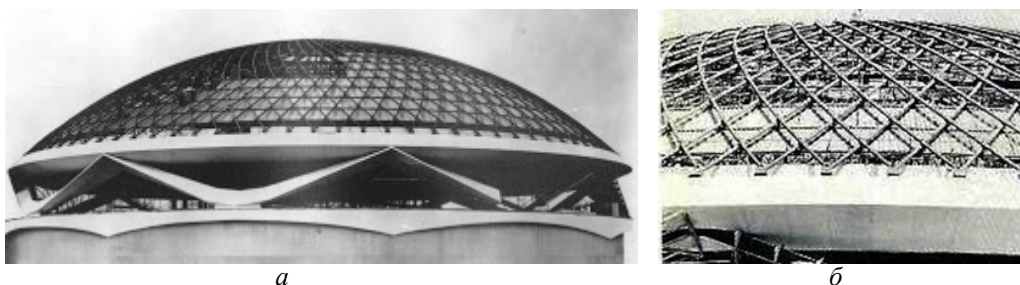


Рис. 22. Купол выставочного павильона «Дженерал Электрик» в Нью-Йорке, 1964-1965
a – общий вид павильона,

б – опирание концов верхних 2-х рядов труб на башмаки распорного кольца

Вторым интересным сетчато-стержневым купольным покрытием из стальных трубчатых элементов, изогнутых по радиусу 90 м и уложенных в три слоя по системе чешского инженера Ф. Ледерера, является купол выставочного павильона «Дженерал Электрик» в Нью-Йорке. Впервые эта система была применена для покрытия выставочного павильона в Брно (рис. 20; 21), но в покрытии павильона фирмы «Дженерал Электрик» кольцевой слой сетчатой конструкции расположен внизу. Диаметр купола – 70 м (рис. 22, *a*). Нижние концы стержней шарнирно опираются на стальные башмаки нижнего железобетонного распорного кольца (рис. 22, *б*). Крепление трубчатых стержней осуществлялось с помощью хомутов. С нижней стороны системы стержней подвешена металлическая кровля.

Концертно-спортивный многофункциональный комплекс в Питтсбурге, США (1963 г.) диаметром 127 м стал первым в мире крытым стадионом с раздвижной крышей. Купол стадиона состоит из 8 лепестков, 6 из которых подвижны и накатываются на 2 неподвижных. Секторные элементы оболочки изготовлены из алюминиевых сплавов. Первоначально комплекс назывался «Сивик одиториум» (Civic Auditorium).



Рис. 23. Многофункциональный комплекс в Питтсбурге, США (1963 г.)

В 1967 году Букминстер Фуллер, уже получивший мировую известность американский архитектор нео-футуристического направления в архитектуре большепролетных пространственных структур, построил из стали и акриловых ячеек известную всем Монреальскую биосферу (рис. 24) диаметром 76 м и высотой 62 м. В полдень 20 мая 1976 года во время реставрации пожар уничтожил

акриловое пленочное покрытие, но стальная решетчатая структура осталась неповрежденной [8].



Рис. 24. Монреальская биосфера Б. Фуллера (The Montreal Biosphère by Buckminster Fuller, 1967)

Рассмотрим еще одну область применения однослойных металлических оболочек, это – сосуды давления, резервуары для хранения воды, каплевидные резервуары для нефти и другие емкости. С точки зрения прочности тонкостенные эллипсоиды вращения являются наиболее оптимальными [9], но и архитектура этих тонкостенных конструкций также должна удовлетворять эстетическим требованиям.

Проектированием резервуаров в форме сфер и эллипсоидов вращения занимаются многие фирмы, в том числе Compliance Resource Center, ICEM Engineering Company Ltd (рис. 25), АЕА Technology (The innovation business), Pittsburgh Tank and Tower Co (рис. 26), ЦНИИПСК им. Мельникова (рис. 27) и многие другие. По-видимому, эта область применения металлических оболочек в середине XX века стала преобладать над другими проектами оболочек из металла (рис. 28).



Рис. 25. Заготовка для емкости

Металлическая архитектура в начале 20-го века была сопряжена со многими недостатками, поэтому с появлением железобетона была быстро заменена.

Главными недостатками стальных конструкций являлись подверженность



Рис. 26. Водонапорная башня

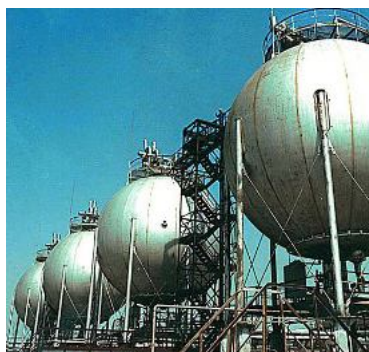


Рис. 27. Шаровые газгольдеры (ЦНИИПСК им. Мельникова, главные инженеры проекта Р.Н. Андреева, Р.И. Опарина)



Рис. 28. Газгольдер (www.artlex.com/ArtLex/T.html)

коррозии и низкая пожарная стойкость (потеря несущей способности при высоких температурах). Для борьбы с коррозией стальных конструкций применялась окраска. В целях пожарной безопасности ответственные стальные конструкции обетонировались или осуществлялся набрызг теплоустойчивых бетонных смесей по сетке на поверхность стальных конструкций, предварительно защищенных минеральной ватой.

Из рассмотренных выше примеров, можно отметить, что конструктивные решения металлических покрытий большепролетных зданий в рассматриваемый период были балочными (в основном с фермами), арочными (рис. 7, 13, 14), пространственными с радиально-кольцевыми ребрами (1, 15 – 17, 19) или с

одно - или двухсетчатой структурой (6, 12, 21, 22). В двухсетчатых конструкциях две эквидистантные (параллельные) сетчатые поверхности соединяются между собой решетчатыми связями.

Металлические структурные плоские перекрытия благодаря большой пространственной жесткости имеют небольшую высоту (1/16-1/20 пролета), ими можно перекрывать большие пролеты. Однако эти конструктивные решения стали активно внедряться только во второй половине XX-го века.

В данной статье намеренно не затрагиваются вопросы проектирования и строительства гибких металлических оболочек: мембранных и тросовых, не рассматриваются и вантовые конструкции. Их необходимо изучать отдельно.

Л и т е р а т у р а

1. Ларионов В.В., Морозов Е.П. Шухов и Бари – творческие портреты и инженерная деятельность// Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2003. – № 5. – С. 2-13.
2. Chiorino M.A., Chiorino Cr. Pier Luigi Nervi: Architecture as Challenge// International Journal of SEWC. – December 2011. – Vol. 1. – № 2. – P. 5-11.
3. Горенштейн Б.В. Железобетонные пространственные конструкции для строительства на севере. – Л.: Стройиздат, 1979. – 160 с.
4. Кривошапко С.Н., Галишиникова В.В. Архитектурно-строительные конструкции. М.: «ЮРАЙТ», 2015. – 476 с.
5. Гохарь-Хармандарян И.Г. Большепролетные купольные здания. – М.: Стройиздат, 1972. – 150 с.
6. Павлов Л.Л. Специфика формирования архитектурно-планировочных решений крытых стадионов с крупногабаритной ареной. – Дис. канд. арх. – М.: МАРХИ, 1975.
7. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Стержневые системы в форме однополостного гиперboloида вращения// Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2011. – № 11. – С. 19-23.
8. Wong, Yunn Chii. The Geodesic Works of Richard Buckminster Fuller, 1948–1968 (The Universe as a Home of Man), PhD thesis, Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Department of Architecture, 1999.
9. Krivoshapko S.N. Research on general and axisymmetric ellipsoidal shells used as domes, pressure vessels, and tanks// Applied Mechanics Reviews (ASME). – November 2007. – Vol. 60, № 6. – P. 336-355.

References

1. Larionov, VV, Morozov, EP (2003). Shukhov and Barry: the creative portraits and engineering activity. *Montazhn. i Spetz. Raboty v Stroitelstve*, № 5, p. 2-13.
2. Chiorino, MA, Chiorino, Cr (2011). Pier Luigi Nervi: Architecture as Challenge. *International Journal of SEWC*. Vol. 1, № 2, p. 5-11.
3. Gorenstein, BV (1979). *Reinforced Concrete Spatial Structures for Building in the North*. L.: Stroizdat, 160 p.
4. Krivoshapko, SN, Galishnikova, VV (2015). *Architectural-and-Building Structures*. Moscow: “YuRAYT”, 476 p.
5. Gohar-Harmandaryan, IG (1972). *Large –Span Dome Buildings*. Moscow: Stroizdat, 150 p.
6. Pavlov, LL (1975). Specific character of forming of architectural-and-design solutions of covered stadiums with large overall arena. *PhD Diss. in Architecture*. Moscow: MARHI.
7. Krivoshapko, SN, Mamieva, IA (2011). Rod systems in the form of one-sheet hyperboloid of revolution. *Montazhn. i Spetz. Raboty v Stroitelstve*, № 11, p. 19-23.
8. Wong, Yunn Chii (1999). The Geodesic Works of Richard Buckminster Fuller, 1948–1968 (The Universe as a Home of Man), *PhD thesis*, Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Department of Architecture.
9. Krivoshapko, SN (2007). Research on general and axisymmetric ellipsoidal shells used as domes, pressure vessels, and tanks. *Applied Mechanics Reviews (ASME)*, Vol. 60, № 6, p. 336-355.

METAL RIBBED-AND-CIRCULAR AND LATTICE SHELLS FROM THE XIXth UNTIL THE FIRST HALF OF THE XXth CENTURIE

Krivoshapko S.N.

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow

At old ages, iron was used as reinforced elements in stone laying. But it became as building materials only after appearance of modern metallurgy. Cardinal changing in the development of metal structures appeared at the beginning of the XIXth century when they began to apply cast iron pillars instead stone and brick pillars. In the paper, rigid metal structures are described beginning from the dome of the Isaac Cathedral in St. Petersburg and ending by the most important objects erected before 1967.

KEY WORDS: metal ribbed-and-circular domes, lattice shells, steel reservoir.

