

Academia. Архитектура и строительство, № 3, стр. 154–164.

Academia. Architecture and Construction, no. 3, pp. 154–164.

Обзоры

Научная статья

УДК 624:72:725:725.4

DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-154-164

Криволинейные формы в архитектуре зданий и сооружений до XXI века

Алборова Лана Анатольевна (Москва). Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений (Россия, 127238, Москва, Дмитровское шоссе, 46, корп. 2. ЦНИИПромзданий).

Мамиева Ираида Ахсарбеговна (Москва). Инженерная академия Российского университета дружбы народов (Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6. РУДН). Эл. почта: i_mamieva@mail.ru

Аннотация. К настоящему времени систематизированы архитектурные стили со своими подвидами и стилевыми течениями применительно к тонким оболочкам и оболочечным структурам. Имеются несколько хронологий развития архитектурных стилей. В статье рассмотрены этапы появления сооружений криволинейной формы в виде поверхностей разных классов. Показано, что первые тонкие оболочки и оболочечные структуры имели форму сферической, цилиндрической поверхностей и некоторых простейших поверхностей вращения. К концу XX века из более чем шестисот известных аналитических поверхностей нашли применение 24. Показано, что пять периодов в развитии архитектуры криволинейных форм совпадают по времени с пятью периодами проектирования и строительства тонких оболочек и оболочечных структур. В данной статье авторы только констатирует реальное положение в архитектуре криволинейных форм XX века и отмечают возросший интерес архитекторов и строителей к таким объектам к концу XX века.

Ключевые слова: криволинейные формы сооружений, архитектура оболочек, аналитические поверхности, этапы строительства оболочек

Для цитирования. Алборова Л.А., Мамиева И.А. Криволинейные формы в архитектуре зданий и сооружений до XXI века // Academia. Architecture and Construction. – 2023. – № 3. – С. 154–164. – DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-154-164.

Curvilinear Forms in Architecture of Buildings and Structures up to the XXI Century

Alborova Lana A. (Moscow). Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures (46, building 2, Dmitrovskoe shosse, Moscow, 127238, Russia. TsNIIPromzdaniy).

Mamieva Iraida A. (Moscow). Academy of Engineering of the The Peoples' Friendship University of Russia (Russia, 117198, Moscow, Miklukho-Maklaya str.6. RUDN). E-mail: i_mamieva@mail.ru

Abstract. To date, the architectural styles have been systematized with their subspecies and style trends in relation to thin shells and shell structures. There are several chronologies of the development of architectural styles. In this article, the stages of the appearance of curvilinear structures in the form of surfaces of different classes are proposed for consideration. It is shown that the first thin shells and shell structures had the shape of spherical, cylindrical surfaces and some of the simplest surfaces of rotation. Till the end of the 20th century, 24 analytical surfaces have been used out of more than six hundred known surfaces. It is shown that 5 periods in the development of the architecture of curved forms coincide in time with 5 periods of design and construction of thin shells and shell structures. The authors only states the real situation in the architecture of curved forms of the 20th century and show the increasing interest of architects and builders in such objects at the end of 20th century.

© Алборова Л.А., Мамиева И.А., 2023.

Keywords: shell architecture, analytical surfaces, shell construction stages

For citation: Alborova L.A., Mamieva I.A. Curvilinear Forms in Architecture of Buildings and Structures up to the XXI Century. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2023, no. 3, pp. 154–164, doi: 10.22337/2077-9038-2023-3-154-164.

Введение

Современные архитекторы, инженеры-строители, учёные-механики и геометры стараются осмыслить достигнутые результаты в различных отраслях науки и практики проектирования и строительства зданий и сооружений оболочечного типа или в форме криволинейных поверхностей ввиду увеличения интереса к таким сооружениям с начала XXI века [1] по сравнению с периодом затухания интереса к таким конструкциям во второй половине XX века. В настоящее время имеется несколько классификаций поверхностей как общего вида [2; 3], так и для отдельных их классов, например [4; 5]. Систематизированы существующие архитектурные стили, их модификации, подвиды, стилевые течения [6] и составлена хронология их появления [7].

Е.В. Сысоева [8] определила четыре этапа создания и развития теории тонких оболочек:

первый этап (середина XVI – середина XIX века) – подготовительный этап формирования и развития теории пластин и оболочек для решения отдельно поставленных задач;

второй этап (конец XIX – начало XX века) – строительная механика материалов активно развивается и становится наукой;

третий этап (1940-е – XX век) – начало общей компьютеризации и появление персональных компьютеров, метода конечных элементов;

четвёртый этап (с начала XXI века – до наших дней) – уточнение математического прикладного аппарата в проектировании конструкций, новые вычислительные комплексы, расчёты оболочек с учётом физической, геометрической и конструктивной нелинейности.

В исследовании предпринята попытка создать хронологию применения криволинейных поверхностей в архитектуре и строительстве пространственных структур и оболочек и показать первые знаковые сооружения в форме канонических поверхностей и новаторские формы сооружений XX века.

Для сокращения объёма данной статьи используется таблица из работы [3], которая доработана и расширена согласно целям исследования. Классы поверхностей указаны в затемнённых рамках.

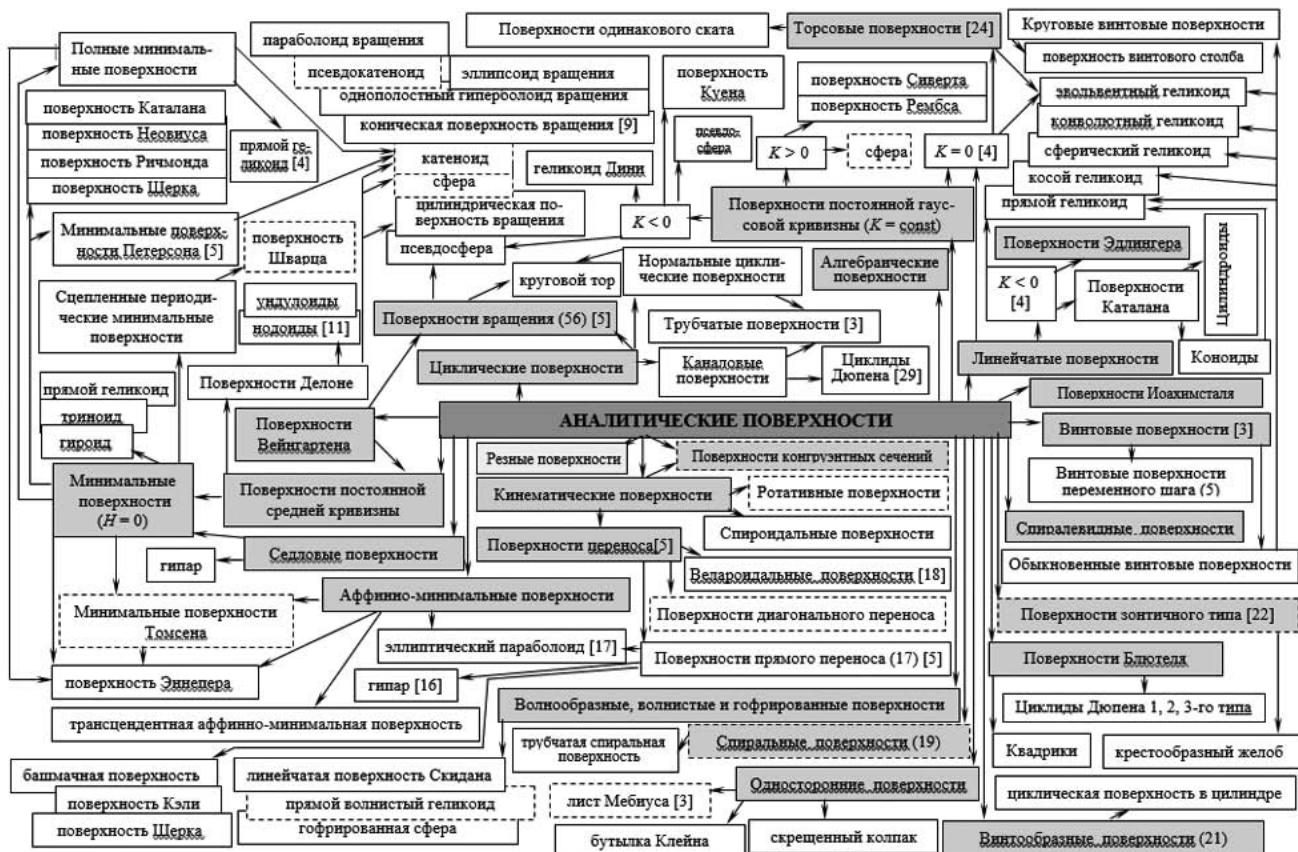


Рис. 1. Классификация аналитических поверхностей. Схема авторов статьи

Начальный этап строительства оболочек. I – XVIII века

В самом начале этапа строители установили, что купольные конструкции на круглом плане являются наиболее выгодной конструктивной формой. История проектирования и строительства куполов насчитывает более 2000 лет. К настоящему времени лучше всего сохранился храм-ротонда Пантеона в Риме (125) со сферическим куполом диаметром 43,2 м.

Европейская история применения параболоида вращения начинается с купола собора святого Петра. Цилиндрические своды храмов являются вкладом Византии в историю как мирового создания оболочек (V–XIII века), так и зодчества в целом. Наиболее грандиозным и самым выдающимся произведением византийских архитекторов стала купольная базилика собора святой Софии в Константинополе (532–537).

Большое распространение купольные конструкции получили в Средней Азии. Одним из важнейших градообразующих элементов мусульманских городов Востока являются круговые конические оболочки минаретов (рис. 1). Конические поверхности использовались также в Закавказье (рис. 2).

В Италии, например, самые старые здания относятся к XVI веку [9]. Круговые конические формы традиционных каменных жилищ Италии возводились без применения раствора, там для формирования куполов религиозных зданий широко применялись эллипсоиды вращения (рис. 3). В Центральной Африке уже много веков строят жилища в форме параболоида вращения (купола) на одну семью.

Таким образом, до XVIII века и в Европе, и в Азии, и в Африке строители интуитивно пришли к самым рациональным формам куполов – сфере (рис. 4) и параболоиду вращения. От сферической формы строители иногда переходили к остроконечной поверхности вращения. Такие купола строились на Востоке в XIII–XV века (рис. 5).

Поверхность винтового столба («поверхность святого Ильи») образовывается винтовым движением окружности постоянного радиуса в плоскостях пучка. Она использовалась при обработке круглых колонн дворцов, замков и т.д. Сейчас её можно увидеть на колоннах при входе в особняк А. Морозова (1895–1899, арх. В. Мазырин) (рис. 6).

В России поверхности вращения можно видеть в формах куполов православных церквей [10], которые с достаточной степенью точности можно считать нооидными поверхностями [11]. Эти поверхности вращения содержат минимальный внутренний объём, ограниченный поверхностью заданной площади.

Тенденция к уменьшению толщин пространственных конструкций, возникновение теории расчёта тонких оболочек. Начало XIX века – 1920-е годы

Толщина древних сводов составляла примерно 1/12 – 1/15 длины пролёта. Даже в XIX веке толщина кирпичных сводов

составляла 1/15 – 1/30 пролёта, а стенок кирпичных куполов 1/25 – 1/50. Купол «Зала Столетия» во Вроцлаве пролётом 65 м (1912) из монолитного железобетона (рис. 7) стал первым сооружением, пролёт которого превысил пролёт Пантеона в Риме [12]. Однако новые формы тонкостенных пространственных конструкций практически не появлялись: всё те же сферические (рис. 8) и параболические купола вращения, а также цилиндрические формы. Однако были и исключения (рис. 9). В 1909 году была возведена железобетонная лестница в форме прямого геликоида на одном из этажей башни в Псковской области в селе Старые Липы. К концу XVIII века



Рис. 1¹. Мавзолей Чашма-Аюб. Бухара, Узбекистан. XIV век: прямые круговые коническая и цилиндрическая поверхности, сферические купола

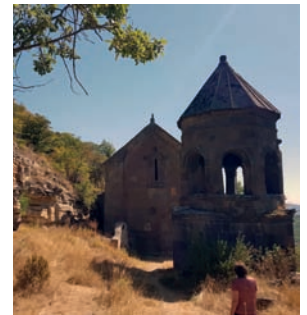


Рис. 2. Тирский монастырь. Южная Осетия. XIII век: круговая коническая поверхность. Фото И.А. Мамиевой



Рис. 3. Собор Сан Марко. Венеция, Италия: эллипсоид вращения

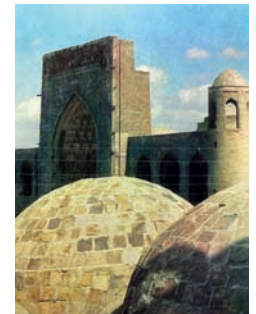


Рис. 4. Медресе Абдуллахана. Бухара, Узбекистан. XVI век



Рис. 5. Ансамбль Шахи-Зинда. Самарканд, Узбекистан. XIV–XV века: заострённые в вершине оболочки вращения



Рис. 6. Вход в особняк А. Морозова XIX века. Москва. Фото И.А. Мамиевой

¹ Здесь и далее рисунки из открытого доступа сети Интернет, кроме особо оговорённых.

конструктивные возможности кирпичных покрытий были исчерпаны.

Инженеры, архитекторы и строители начали переходить к использованию металлических конструкций, которые в XIX веке открыли новую эпоху в промышленном и гражданском строительстве (рис. 10). Стали появляться первые железобетонные оболочки (рис. 11). Однако в архитектуре этих железобетонных построек существовал разрыв между качественно новой конструкцией покрытия и структурой сооружения, воплощавшей инерцию прошлого.

В этот период появилась первая железобетонная градирня (рис. 12), форма которой была положена в дальнейшем в основу сотен других градирен.

Цилиндрические поверхности используются в архитектуре и строительстве с давних времён [13]. Иногда это – единственно возможная форма. Цилиндрические формы сооружений были особенно популярны в начале XX века (архитектурный стиль – деко). Цилиндрические сооружения можно условно разделить на сооружения с вертикальными, горизонтальными и наклонными относительно земной поверхности осями. Сооружения в форме цилиндрической поверхности вращения можно встретить в любом городе мира. В

Москве эту поверхность вращения активно пропагандировал архитектор К.С. Мельников, который считал, что круглая форма позволяет экономить строительные материалы (рис. 13). Построенное им в 1927–1929 годы здание, называемое теперь «Дом Мельникова», стал знаменитым монументом советского авангарда в архитектуре.

Этот период знаменателен появлением линейной теории тонких оболочек. Её основы заложил Г. Арон (H. Aron) в 1874 году. Неточности предложенной им теории, были в 1888 году замечены А. Лявом (A. Love), который представил уравнения теории тонких оболочек в законченном виде. Эти уравнения использовались до 1947 года, пока А.И. Лурье не указал на некоторые дефекты уравнений А. Лява [14].

С этого момента при проектировании тонких оболочек использовались не только экспериментальные методы, но и теоретическое обоснование.

Французский искусствовед М. Рагон (M. Ragon) в 1958 году впервые предложил хронологию развития архитектуры с конца XIX века до периода «модернистской» архитектуры (до 1925 года). В это время на развитие новой архитектуры большое влияние оказывали инженеры, которые в течение всего XIX века проектировали и строили основные сооружения

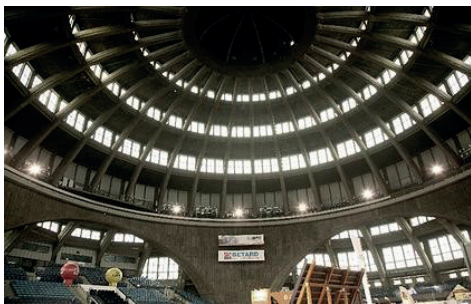


Рис. 7. «Зал Столетия». Вроцлав, Польша. Архитектор М. Берг, инженер Трауэр. 1911–1913 годы. Фото: © А. Бархин



Рис. 8. Сооружение «Гётеанум-1» с полностью деревянным каркасом (сгорело в конце 1922 года). Город Дорнах, Швейцария. 1915 год. Считается первым сооружением бионической архитектуры: сферический купол



Рис. 9. Школа для детей рабочих. Испания. Архитектор А. Гауди. 1908 год: покрытие в форме синусоидального коноида. Фото Н.С. Кривошапко



Рис. 10. Плоские металлические фермы в дебаркадере Киевского вокзала. Инженер В.Г. Шухов. 1912–1917 годы: цилиндрическая поверхность с горизонтальной осью



Рис. 11. Бетонные параболические цилиндрические ангары. Город Истр, Франция. Архитектор Э. Фрейссине. 1917 год

криволинейной формы. Архитекторы в этот период времени фактически были только декораторами [15].

Эпоха «золотого века тонких оболочек». 1922–1965 годы

В этот период толщина железобетонных гладких куполов стала достигать $1/650$ – $1/760$ величины пролёта. Был возведён самый большой для того времени железобетонный купол Новосибирского театра пролётом 55,5 м при толщине 8 см (1934, инж. П. Пастернак).

Поверхности прямого переноса стали пользоваться большой популярностью у заказчиков. Они легки в изготовлении, функциональны, можно легко поменять назначение сооружения, экономически целесообразны для промышленных зданий. Фабрика резиновых изделий в Бринморе (Южный Уэльс, Англия. Арх. Н. Аруп) была возведена в 1947 году из девяти однотипных секций толщиной 7,5 см в форме поверхностей переноса окружности радиусом 24,8 м по окружности радиусом 32,4 м. Эта форма покрытия сыграла прогрессивную роль в дальнейшем распространении пологих оболочек подобного типа при проектировании промышленных зданий. В настоящее время построены сотни оболочек прямого переноса с разнообразными направляющими и образующими кривыми их срединных поверхностей. Эти оболочки также могут выполняться в сборном варианте, например, здание павильона промышленности ВДНХ в Ереване (1961, арх. Л. Геворкян, Д. Торосян). Оболочка размером в плане 46×46 м собиралась из 144 сборных армоцементных элементов размером 4×4 м.

Однополостный гиперболоид вращения воплощён в сотнях градирен. Кроме того, эта оболочка нашла применение во многих гражданских и промышленных сооружениях, например, она используется в форме здания планетария в городе СанЛуи (1963, США).

Большое число примеров оболочек в форме гипара, сферы, однополостного гиперболоида вращения, построенных до 1963 года, приведено в статье [16]. Наиболее широко проектировались и строились сферические (рис. 14, 15) и параболические купола вращения (рис. 16, 17).

Применение эллиптических параболоидов можно продемонстрировать на примере железобетонного купольного покрытия с размерами на прямоугольном плане $68,6 \times 38,12$ м и толщиной 7,5 см рынка «Смитфилд» в Лондоне (1963), ярмарки в Оклахоме (1965, США) с размерами прямоугольного плана $121,9 \times 97,5$ м. В обоих случаях эллиптический параболоид рассматривался как поверхность переноса. Форму эллиптического параболоида использовали архитекторы Индии, Венгрии, Китая [17] и многих других стран.

Редко применяемую велароидальную поверхность относят к поверхностям переноса. Велароидальная поверхность получается переносом одной плоской кривой по другой, но с изменяющейся кривизной на плоском четырёхугольном контуре. Так осенью 1960 года построен пологий купол Некрасовского рынка в Санкт-Петербурге [18]. Известен также

велароидальный купол, запроектированный и построенный инженером М. Михайлеску [19].

В 1928 году впервые инженер Л.А. Макарова опубликовала материалы с изложением идеи покрытия в виде гиперболического параболоида на прямоугольном плане. Но только в начале пятидесятых годов XX века произошёл взрыв интереса



Рис. 12. Первая железобетонная градирня. Город Херлен, Нидерланды. Инженер Ф. ван Итерсон. 1918 год



Рис. 13. Дом Мельникова. Москва. 1929 год: прямой круговой цилиндр. Фото И.А. Мамиевой



Рис. 14. Антарктическая станция США «Амундсен-Скотт» на Южном полюсе. 1956 год: геодезическая сфера Б. Фуллера



Рис. 15. «Светящийся купол» (The Shine Dome) – административный корпус Австралийской академии наук. Архитектор. Р. Граундс. В 1959 году – самый большой купол Австралии: пологая сфера

к сооружениям, выполненным в форме гипара или составленного из фрагментов гиперболического параболоида. Именно модели сооружений, содержащие в себе несколько фрагментов гипара, вызвали наибольший интерес и стали популярны у архитекторов. Возможности гипара так велики и визуально настолько разнообразны, что всегда можно получить сооружение, обладающее индивидуальными признаками. Антон Тедеско (Anton Tedesco) – изобретатель тонкостенных оболочечных железобетонных конструкций тоже участвовал в проектировании гипара, который в своё время считался самым длинным в мире [20]. Ярким представителем сооружений в форме гипаров является собор Пресвятой Девы Марии (арх. Кэндзо Танге) высотой 39,4 м, возведённый в 1964 году из железобетона. Он состоит из восьми фрагментов гиперболических параболоидов.

Сферических поверхностей, воплощённых в оболочках, существует достаточно много. Например, электронный ускоритель в Тулузе (1960, арх. С. Монтень, Франция), сетчатостержневой купол выставочного павильона в Брно (1959), павильон в Сокольниках (1959, инж. Б. Фуллер, Москва), санаторий в

Кливленде (1950-е, США) и др. Первый сферический геодезический купол, разработанный Р. Фуллером, был построен в 1960 году в Ботаническом саду Миссури.

Главный купольный объём реактора комплекса атомного центра ФРГ вблизи Мюнхена, построенный в 1957 году, выполнен в виде монолитной эллиптической оболочки вращения. Аналогичный реактор построен в штате Нью-Джерси (США) в 1958 году. По-видимому, это были первые оболочки в форме эллипсоида вращения. Но не всегда форма эллипсоида вращения, воплощённая в натуре, вызывает эстетическое удовлетворение. Например, некоторые архитекторы считают, что металлическое покрытие спортивного зала в Атланте (1957, США) в форме сплюснутого эллипсоида кажется придавленным под тяжестью собственного веса. Совсем другие эмоции вызывает эллиптический купол вращения крытого стадиона в парке города Сан-Паулу (1958, арх. Де Кастро Мелло, Бразилия). Здесь купол опирается на систему наклонных стоек.

В 1965 году архитектор И. Штраус (Ivan Štraus) придумал (по-видимому, впервые) форму кругового тора музею Авиации в Белграде (Сербия) (рис. 18).



Рис. 16. Железобетонный купол Московского планетария диаметром 27 м и толщиной около 7 см. Архитекторы М.О. Бари и М.И. Синявский. 1929 год: параболоид вращения. Фото И.А. Мамиевой



Рис. 17. Купол павильона «Машиностроение» (теперь – пав. «Космос»). Москва. Архитекторы В. Андреев, И. Таранов и Н. Быкова. 1939 год: параболоид вращения. Фото С.Н. Кривошапко



Рис. 18. Музей Авиации. Белград, Сербия. 1968 год: круговой тор



Рис. 19. Ресторан «Жемчужина». Баку, Азербайджан. Архитекторы В. Шульгин, Р. Шарифов. 1962 год: зонтичная поверхность из восьми фрагментов гипара, железобетон



Рис. 20. Центральный рынок. Руайян, Франция. Архитекторы Симон и Мориссо (Simon et Morisseau). 1956 год: зонтичная поверхность, монолитный железобетон



Рис. 21. Водонапорная башня (Magnolia water tank). Вашингтон, США. 1956 год: каплевидная поверхность с плоским основанием внизу

В эпоху «золотого века тонких оболочек» многие увлеклись строительством зонтичных оболочек [21] (рис. 19, 20). Например, зонтичный купол здания рынка в Руайяне (1955, Франция) (рис. 19), состоящий из тринадцати одинаковых, расположенных вокруг вершины элементов, продемонстрировал широкие возможности зонтичных поверхностей. Волна в радиальном направлении имеет параболическое очертание, а в направлении окружности – синусоида. Приблизительно в то же время построены зонтичные оболочки в Бухаресте – цирк (1960), в СанХуане – ресторан (1956, Пуэрто-Рико, арх. Т. Феррер) и многие другие [22].

В этот период времени большой популярностью у архитекторов пользовалась форма капли воды, лежащей на плоскости [23] (рис. 21).

Геометрические исследования торсовых поверхностей начал Г. Монж в 1805 году, и они никогда не прерывались. Более пятисот научных статей было опубликовано к началу XXI века [24], и они продолжают публиковаться. К этому времени эти поверхности нашли широкое применение в судостроении, самолётостроении, в сельскохозяйственном машиностроении и в автодорожном строительстве. Однако реальные примеры использования торсов в промышленном и гражданском строительстве не обнаружены.

М. Рагон [15] называет этот этап «модернисткой архитектурой». Как он считал, модернизм особенно развивался между 1925 и 1963 годами.

**Эпоха угасания интереса к строительству оболочек.
1966 год – конец XX века**

О потере интереса у архитекторов к строительству и проектированию тонких жёстких оболочек было написано в [16]. Одной из причин этого является высокая стоимость оболочек в сравнении с мембранными структурами (тентовыми, из металлического листа и пневматическими оболочками).

В основном строились функционально необходимые конструкции и сооружения (рис. 22, 23, 24). Например, из пяти типов винтовых линейчатых поверхностей нашли применение только прямые и развёртывающиеся геликоиды,

которые можно увидеть в формах автомобильных пандусов и пандусов для прохода людей.

В архитектуре последней четверти XX века продолжался процесс, который можно назвать «взрыв формотворчества». Великим первооткрывателем новых форм в архитектуре был Пьер Луиджи Нерви. Раскрывая тайны структурных формообразований растительного мира, Ю.С. Лебедев [25] в 1960-е годы сформировал архитектурную бионику.

Начинают внедряться одно-, двух-, трёхслойные купола из всё ещё дорогих пластмасс и композитов. Разрабатываются светопрозрачные конструкции, защитные оболочки радиорелейных станций. Финский архитектор М. Сууронен в 1968 году предложил для внедрения «Дом будущего» в форме эллипсоида вращения (рис. 25). До 1979 года было создано несколько десятков таких домов. Несмотря на инновационность и оригинальность, они, по мнению ряда архитекторов, стали скорее провалом, чем успехом из-за конструктивных недостатков.

В это время публикуются интересные обзоры по геометрии, расчёту и возможностям применения тонких оболочек в архитектуре и строительстве [9; 16; 23; 24; 26 и др.], продолжают строиться тонкие оболочки вращения (рис. 26) и составные зонтичные оболочки (рис. 27).

Авторы пытались пробудить интерес к проектированию оболочек в форме канонических и неканонических форм. Их усилия не пропали даром, и есть надежда, что скоро наступит эпоха возрождения интереса к оболочкам. Об этом свидетельствует начало проектирования и строительства интересных архитектурных объектов, например, ажурные железобетонные стержневые структуры, зонтичные и сферические оболочки комплекса «Город искусства и науки», состоящего из шести зданий (рис. 28), самый большой в мире зонтичный стадион (1989, Пхеньян, КНДР), образованный шестнадцатью однотипными железобетонными сегментами, и др.

Хотя объём строительства большепролётных оболочечных структур и тонких оболочек в этот период в мире значительно уменьшился, креативные архитекторы продолжали создавать единичные сооружения криволинейных форм.



Рис. 22. Винтовой автомобильный пандус. Италия. Фото Н.С. Кривошапко



Рис. 23. Цилиндрическая часть общественного здания. Москва, Алтуфьевское шоссе. Фото С.Н. Кривошапко



Рис. 24. Музей-панорама «Сталинградская битва». Волгоград. 1973 год: однополостный гиперболоид вращения. Фото А. Щербака



Рис. 25. Кафе «Чайная тарелка». Краснодар. 1979 год: трёхслойная оболочка, эллипсоид вращения. Фото С.Н. Кривошапко

В результате исследования выделено пять периодов в развитии архитектуры криволинейных форм.

Практически все описанные в статье типы поверхностей нашли довольно широкое применение в рассматриваемый период времени. Невостребованными, к сожалению, остались такие интересные с архитектурной и функциональной точки зрения поверхности как поверхности зонтичного типа, диагонального переноса велароидального типа, плоскопараллельного переноса конгруэнтных кривых, циклические поверхности [28], в частности, циклиды Дюпена [29], минимальные поверхности и др. Не в полной мере использовались циклические спиралевидные и винтообразные поверхности.

Авторы разделяют позицию тех исследователей, которые утверждают, что уже в конце XX и особенно в начале XXI века интерес к проектированию и строительству тонких оболочек и оболочечных структур возрождается, особенно у молодых архитекторов и инженеров.

Заключение

Приведённые примеры форм архитектурных оболочек – лишь малая часть того огромного количества разнообразных форм, которые уже в XX веке были предложены или реализованы. Архитекторы по разному подходят к вопросу расширения круга поверхностей для использования в зданиях различного функционального назначения. Г. Колонетти писал: «Мыслимые в конструкциях формы практически неисчерпаемы в своём многообразии». Известный испанский инженер Э. Торроха отмечает: «Лучшим сооружением является то, надёжность которого обеспечивается главным образом за счёт его формы, а не за счёт прочности его материала. Последнее достигается просто, тогда как первое, наоборот, с большим трудом. В этом заключается прелесть поисков и удовлетворение от открытий».

Если в первой четверти XX века архитекторы фактически были декораторами сооружений криволинейных форм, предложенных инженерами, то позже они стали создавать шедевры большепролётных оболочечных структур и тонких оболочек, а также зданий криволинейной формы, а инженеры стали субподрядчиками у архитекторов.



Рис. 26. «Яйцо ветров» (The Egg of the Winds). Токио, Япония. Архитектор Тойон Ито (Toyo Ito). 1991 год: эллипсоид вращения



Рис. 27. Станция метро «Исани». Тбилиси, Грузия. Архитекторы Г. Модзманишвили, Н. Ломсадзе. 1971 год: зонтичная поверхность, покрытие из монолитного железобетона толщиной 6–10 см, размеры в плане 30×40 м



Рис. 28. Планетарий в комплексе «Город искусства и науки». Валенсия, Испания. Архитектор С. Калатрава. 1998 год: полусфера

Список источников

1. Krivoshapko, S.N. Shell structures and shells at the beginning of the 21st century / S.N. Krivoshapko. – DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-6-553-561. – Текст : непосредственный // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2021. – Vol. 17, № 6. – P. 553–561.

2. Гринько, Е.А. Классификация аналитических поверхностей применительно к параметрической архитектуре и машиностроению / Текст : непосредственный // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – Т. 19. – № 4. – С. 438 – 456.

3. Мамиева, И.А. Влияние геометрических исследований редких типов поверхностей на создание новых и уникальных сооружений / И. А. Мамиева, А. Ж. Гбагуди. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2019. – № 5 (85). – С. 23–34.

4. Кривошапко, С.Н. Аналитические линейчатые поверхности и их полная классификация / С.Н. Кривошапко – DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-2-131-138. –Текст : непосредственный // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2020 – Т. 16, № 2. – С. 131–138.

5. Страшнов, С.В. К вопросу о классификации аналитических поверхностей / С.В. Страшнов, М.И. Рынковская. – DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-1-36-43. – Текст : непосредственный // Геометрия и графика. – 2022. – Том 10, № 1. – С. 36–43.

6. Кривошапко, С.Н. Этапы и архитектурные стили в проектировании и строительстве оболочек и оболочечных конструкций / С.Н. Кривошапко, А. Бок Кристиан, Матье Жиль-Улбе. – DOI: 10.33979/2073-7416-2022-102-4-112-131. – Текст : непосредственный // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 4 (102). – С. 112–131.

7. Кривошапко, С.Н. Оболочечные структуры: генезис, материалы и подвиды. Часть 1: Подвиды и направления / С.Н. Кривошапко, Л.А. Алборова, И.А. Мамиева. – DOI: 10.22337/2077-9038-2021-3-125-134. – Текст : непосредственный // Academia. Архитектура и строительство. – 2021. – № 3. – С. 125–134.

8. Сысоева, Е.В. Научные подходы к расчёту и проектированию большепролетных конструкций / Е.В. Сысоева. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2017. – Том 12, № 2 (101). – С. 131–141.
9. Мамиева, И.А. Знаковые пространственные сооружения в форме конических поверхностей / И.А. Мамиева, А.Д. Разин. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – № 10. – С. 5–11.
10. Вайнтрауб, Л.Р. Святыни православной Москвы. Храмы северного округа / Вайнтрауб Л.Р., Карпова М.Г., Скопин В.В. – Москва : Старая Басманная, 1997. – 272 с. – ISBN 5-8468-0052-1. – Текст : непосредственный.
11. Пульпинский, Я.С. Купол русской церкви как оболочка оптимальной формы / Я.С. Пульпинский. – Текст : непосредственный // Труды Международного форума по проблемам науки, техники, образования : В 2 томах : Том I / Под редакцией В.П. Савиных, В.В. Вишневецкого. – Москва : Академия наук о Земле, 2001. – С. 95–97
12. Krivoshapko, S.N. Chronology of Erection of the Earliest Reinforced Concrete Shells / S.N. Krivoshapko, Christian A. Bock Hyeng, I.A. Mamiyeva. – Текст : непосредственный // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. – 2014. – Vol. 18, Iss. 2. – P. 95–108.
13. Krsić, Sonja. Geometrijske površi u arhitekturi / Sonja Krsić. – Niš: Štampa Galaksija, 2012. – 238 с. – Текст : непосредственный.
14. Новожилов, В.В. Линейная теория тонких оболочек / В.В. Новожилов, К.Ф. Черных, Е.И. Михайловский – Ленинград : Политехника, 1991. – 658 с. – ISBN 5-7325-0127-4.
15. Рагон, М. О современной архитектуре / Мишель Рагон. – Москва : Госстройиздат, 1963. – 232 с. – Текст : непосредственный.
16. Special structures. Past, Present, and Future / R. Bradshaw, D. Campbell, M. Gargari [и др.]. – Текст : непосредственный // Journal of Structural Engineering. – June 2002. – P. 691–701
17. Fa-Kun Yao. Combinatory Net-Shell Roofs of Elliptic Paraboloid of Zhaoqing Gymnasium / Fa-Kun Yao. – Текст : непосредственный // Proc. of the IASS-ASCE Intern. Symposium "Spatial, Lattice and Tension Structures". April 24–28, 1994, Atlanta. – New York : American Society of Civil Engineers, 1994, – P. 642–651. (In Engl.) P. 642–651.
18. Алборова, Л.А. Возможности велароидальных оболочек / Алборова Л.А. – Текст : непосредственный // Инженерные системы : Труды научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 60-летию Российского университета дружбы народов : В 2 томах. Москва, 14–16 октября 2020 г. / под ред. М. Ю. Мальковой. – Москва : РУДН, 2020. – С. 59–65. – ISBN 978-5-209-10101-7.
19. Mihailescu, M. Velaroidal Shells for Covering Universal Industrial Halls / M. Mihailescu, I. Horvath. – Текст : непосредственный // Acta techn. Acad. sci. hung. – 1977, № 85 (1-2). – P. 135–145.
20. Мамиева, И.А. Влияние геометрических исследований линейчатых поверхностей на создание уникальных сооружений / И.А. Мамиева. – DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-4-299-307. – Текст : непосредственный // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2019. – 15 (4). – С. 299–307
21. Лебедев, В.А. Тонкостенные зонтичные оболочки / В.А. Лебедев. – Ленинград : Госстройиздат, 1958. – 172 с. – Текст : непосредственный.
22. Кривошапка, С.Н. Зонтичные поверхности и поверхности зонтичного типа в архитектуре / С.Н. Кривошапка, И.А. Мамиева // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 7 (1). – С. 27–31.
23. Гринько, Е.А. Каплевидные оболочки / Е.А. Гринько. – Текст : непосредственный // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2019. – № 6. – С. 50–56.
24. Krivoshapko, S.N. Static Analysis of Shells with Developable Middle Surfaces / S.N. Krivoshapko. – DOI: 10.1115/1.3098985 EID: 2-s2.0-0008891169. – Текст : непосредственный // Applied Mechanics Reviews. – 1998. – Vol. 51, № 12, Part 1. – P. 731–746.
25. Лебедев, Ю.С. Архитектура и бионика / В.А. Лебедев. – Москва : Стройиздат, 1977. – 220 с. – Текст : непосредственный.
26. Lee, Y.S. Review on the Cylindrical Shell Research / Y.S. Lee. – Текст : непосредственный // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers. – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 1–26.
27. Research on the Application of Pop Art in modern Architectural Form Design / Wang Bohan, Liu Su, Zheng Fei, Zhong Meiling. – DOI: 10.1088/1755-1315/495/1/012049. – Текст : электронный // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – June 2020. – № 495 (1). – P. 012049. – URL: https://www.researchgate.net/publication/342108347_Research_on_the_Application_of_Pop_Art_in_Modern_Architectural_Form_Design (дата обращения 12.08.2023).
28. Hyeng Christian A. Bock, Application of Cyclic Shells in Architecture, Machine Design, and Bionics / Hyeng Christian A. Bock, Yamb Emmanuel B. – Текст : непосредственный // Int. J. of Modern Engineering Research. – 2012. – Vol. 2. – Iss. 3. – Pp. 799–806.
29. Бойков, И.К. Геометрия циклид Дюпена и их применение в строительных объектах / И.К. Байков. – Текст : непосредственный // Расчёт оболочек строительных конструкций. – Москва : УДН, 1982. – С. 116–129.

References

1. Krivoshapko, S.N. Obolocheknyye struktury i obolochki v nachale XXI v. [Shell Structures and Shells at the Beginning of the 21st Century]. In: *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii* [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings], 2021, Vol. 17, no. 06, pp. 553–561, DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-6-553-561. (In Russ., in Engl.)
2. Grin'ko E.A. Klassifikatsiya analiticheskikh poverkhnostei primenitel'no k parametricheskoi arkhitekture i mashinostroeniyu

[Classification of Analytical Surfaces as Applied to Parametrical Architecture and Machine Building]. In: *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya [RUDN Journal of Engineering Research]*, 2018, Vol. 19, no. 4, pp. 438–456. (In Russ., abstr. in Engl.)

3. Mamieva I.A., Gbaguidi-Aisse G.L. Vliyanie geometricheskikh issledovaniy redkikh tipov poverkhnostei na sozdanie novykh i unikal'nykh sooruzhenii [Influence of the Geometrical Researches of Rare Type Surfaces on Design of New And Unique Structures]. In: *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 2019, no. 5 (85), pp. 23–34. (In Russ., abstr. in Engl.)

4. Krivoschapko S.N. Analiticheskie lineichatye poverkhnosti i ikh polnaya klassifikatsiya [Analytical Ruled Surfaces and Their Complete Classification]. In: *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]*, 2020, Vol. 16, no. 2, pp. 131–138, DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-2-131-138. (In Russ., in Engl.)

5. Strashnov, S.V., M.I. Rynkovskaya. K voprosu o klassifikatsii analiticheskikh poverkhnostei [To the Question of the Classification for Analytical Surfaces]. In: *Geometriya i grafika*, 2022, Vol. 10, no. 1, pp. 36–43, DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-1-36-43. (In Russ.)

6. Krivoschapko S.N., A. Bok Kristian, Mat'e Zhil'-Ulbe. Etapy i arkhitekturnye stili v proektirovanii i stroitel'stve obolochek i obolocheknykh konstruksii [Stages and Architectural Styles in Design and Building of Shells and Shell Structures]. In: *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*. – 2022. – № 4 (102). – S. 112–131, DOI: 10.33979/2073-7416-2022-102-4-112-131. (In Russ., abstr. in Engl.)

7. Krivoschapko S.N., Alborova L.A., Mamieva I.A. Obolocheknyye struktury: genезis, materialy i podvidy. Chast' 1: Podvidy i napravleniya [Shell Structures: Gen-esis, Materials and Subtypes. Part 1. Subtypes and Directions]. In: *Akademiya. Arkhitektura i Stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]*, 2021, no. 3, pp. 125–134, DOI: 10.22337/2077-9038-2021-3-125-134. (In Russ., abstr. in Engl.)

8. Sysoeva E.V. Nauchnye podkhody k raschetu i proektirovaniyu bol'sheproletnykh konstruksii [Scientific Approaches to Calculation and Design of Large-Span Structures]. In: *Vestnik MGSU*, 2017, Vol. 12, no. 2 (101), pp. 131–141. (In Russ., abstr. in Engl.)

9. Mamieva I.A., Razin A.D. Znakovye prostranstvennye sooruzheniya v forme konicheskikh poverkhnostei [Landmark Spatial Structures in the Form of Conic Surfaces]. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2017, no. 10, pp. 5–11. (In Russ., abstr. in Engl.)

10. Vaintraub L.R., Karpova M.G., Skopin V.V. Svyatyni pravoslavnoi Moskvy. Khramy severnogo okruga [Shrines of Orthodox Moscow. Temples of the Northern District]. Moscow, Staraya Basmannaya Publ., 1997, 272 p., ISBN 5-8468-0052-1. (In Russ.)

11. Pul'pinskiy Ya.S. Kupol russkoi tserkvi kak obolochka optimal'noi formy [The Dome of the RUSSIAN CHURCH as a Shell of the Optimal Form]. In V.P. Savinykh, V.V. Vishnevskii (eds.): *Trudy mezhdunarodnogo foruma po problemam nauki, tekhniki, obrazovaniya [Proceedings of the International Forum on Problems of Science, Technology, Education]*, in 2 volumes, Vol. 1. Moscow, Akademiya nauk o Zemle [Academy of Sciences of the Earth] Publ., 2001, pp. 95–97. (In Russ.)

12. Krivoschapko S.N., Christian A. Bock Hyeng, Mamieva I.A. Chronology of Erection of the Earliest Reinforced Concrete Shells. In: *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 2014, Vol. 18, Iss. 2, pp. 95–108. (In Engl.)

13. Krasici Sonja. Geometrijske površi u arhitekturi [Geometric Surfaces in Architecture]. Niš, Štampa Galaksija, 2012, 238 s. (In Czech)

14. Novozhilov V.V., Chernykh K.F., Mikhailovskii E.I. Lineinaya teoriya tonkikh obolochek [Linear Theory of Thin Shells]. Leningrad, Politehnika Publ., 1991, 658 p., ISBN 5-7325-0127-4. (In Russ.)

15. Mishel' Ragon. O sovremennoi arkhitekture [About Modern Architecture]. Moscow, Gosstroizdat Publ., 1963, 232 p. (In Russ.)

16. Bradshaw R., Campbell D., Gargari M., Mirmiran A. and Tripeny P. Special Structures. Past, Present, and Future. In: *Journal of Structural Engineering*, June 2002, pp. 691–701. (In Engl.)

17. Fa-Kun Yao. Combinatory Net-Shell Roofs of Elliptic Paraboloid of Zhaoqing Gymnasium. In: *Proc. of the IASS-ASCE Intern. Symposium "Spatial, Lattice and Tension Structures"*, April 24–28, 1994, Atlanta. New York, Published by the American Society of Civil Engineers, 1994, – P. 642–651. (In Engl.)

18. Alborova L.A. Vozmozhnosti velaroidal'nykh obolochek [Possibilities of velaroidal shells]. In Yu. Mal'kova (ed.): *Inzhenernye sistemy [Engineering Systems]*, Proceedings of the scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 60th anniversary of the Peoples' Friendship University of Russia, in 2 volumes. Moscow, October 14–16, 2020. Moscow, RUDN Publ., 2020, pp. 59–65, ISBN 978-5-209-10101-7. (In Russ.)

19. Mihailescu M., Horvath I. Velaroidal Shells for covering Universal Industrial Halls. In: *Acta Techn. Acad. Sci. Hung*, 1977, 85 (1-2), pp. 135–145. (In Engl.)

20. Mamieva, I.A. Vliyanie geometricheskikh issledovaniy lineichatykh poverkhnostei na sozdanie unikal'nykh sooruzhenii [Influence of the Geometrical Researches of Ruled Surfaces on Design of Unique Structures]. In: *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2019, no. 15(4), pp. 299–307, DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-4-299-307. (In Engl.)

21. Lebedev V.A. Tonkostennye zontichnye obolochki [Thin-Walled Umbrella Shells]. Leningrad, Gosstroizdat Publ., 1958, 172 p. (In Russ.)

22. Krivoschapko S.N., Mamieva I.A. Zontichnye poverkhnosti i poverkhnosti zontichnogo tipa v arkhitekture [Umbrella

- Surfaces and Surfaces OF Umbrella Type in Architecture]. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2011, no. 7 (1), pp. 27–31. (In Russ., abstr. in Engl.)
23. Grin'ko E.A. Kaplevidnye obolochki [Drop-Shaped Shells]. In: *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii [Structural Mechanics and Analysis of Constructions]*, 2019, 6, pp. 50–56. (In Russ., abstr. in Engl.)
24. Krivoshapko S.N. Static Analysis of Shells with developable Middle Surfaces. In: *Applied Mechanics Reviews*, 1998, Vol. 51, no. 12, Part 1, pp. 731–746, DOI: 10.1115/1.3098985 EID: 2-s2.0-0008891169. (In Engl.)
25. Lebedev Yu.S. Arkhitektura i bionika [Architecture and Bionics]. Moscow, Stroizdat, 1971, 220 p. (In Russ.)
26. Lee Y.S. Review on the Cylindrical Shell Research. In: *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 2009, Vol. 33, no. 1, pp. 1–26. (In Engl.)
27. Bohan Wang, Su Liu, Fei Zheng, Meiling Zhong. Research on the Application of Pop Art in Modern Architectural Form Design. In: *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, June 2020, 495(1):012049, DOI: 10.1088/1755-1315/495/1/012049. URL: https://www.researchgate.net/publication/342108347_Research_on_the_Application_of_Pop_Art_in_Modern_Architectural_Form_Design (Accessed 08/12/2023). (In Engl.)
28. Hyeng Christian A. Bock, Yamb Emmanuel B. Application of Cyclic Shells in Architecture, Machine Design, and Bionics. In: *Int. J. of Modern Engineering Research*, 2012, Vol. 2, Iss. 3, pp. 799–806. (In Engl.)
29. Boikov I.K. Geometriya tsiklid Dyupena i ikh primeneniye v stroitel'nykh ob"ektakh [Geometry of Dupin Cyclides and Their Application in Construction Projects]. In: *Raschet obolochek stroitel'nykh konstruktsii [Calculation of Shells of Building Structures]*. Moscow, UDN Publ., 1982, pp. 116–129. (In Russ.)