

УДК [514.8:004.9]:378

Ахметзянов Р.И. – студент

E-mail: nrustem@bk.ru

Данченко Л.В. – старший преподаватель

E-mail: d9700@yandex.ru

Рыбалкина Р.И. – старший преподаватель

E-mail: pr1948@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Геометрические и конструктивные особенности гиперboloидных конструкций

Аннотация

Данная статья содержит сведения из истории применения гиперboloидных конструкций в архитектуре и строительстве. Рассмотрены особенности зданий и сооружений различных эпох, с конца XIX века и до наших дней. На основе данных анализа творческих концепций, архитектурной формы и конструкторских решений значимых гиперboloидных сооружений делаются выводы о роли исследуемых поверхностей в истории архитектуры и строительной практике.

Ключевые слова: гипар, гиперболический параболоид, однополостный гиперboloид, гиперboloидные конструкции, оболочка, телебашня, стержневая конструкция.

В современном мире использование в архитектуре и строительстве необычных, смелых форм и конструкций приобретает немислимые масштабы. Архитекторы стремятся создать поверхности, которые порой нельзя задать кинематически или системой уравнений. Они рисуются «от руки», задаются сложной математической моделью, дополнительно дорабатываются с помощью 3D-программ. Но несомненно, что среди всего разнообразия поверхностей, используемых в архитектуре, линейчатые являются самыми распространенными. Они используются для образования как классических, так и экстравагантных форм.

Формы древних сооружений близки к многогранникам, а грань – участок плоскости, как простейшей линейчатой поверхности.

Самые заметные виды сооружений романского периода – храмы-крепости и замки-крепости. А их главные компоненты – башня, колонна и арка, простейшие цилиндрические поверхности. Эти детали составляют конструкционную базу неф и базилик. Эти компоненты сохраняются и в готических сооружениях, но они удлиняются и усложняются, образуя просторные помещения с высоким потолком. Вертикальное расположение образующих доминирует, чтобы подчеркнуть мрачное изящество и стремление готических сооружений ввысь. Яркий пример здания этого периода – Миланский Собор со множеством шпилей и скульптур, мраморных остроконечных башенок и колонн. Последовавшие позже периоды в архитектуре не были отмечены использованием радикально новых видов линейчатых поверхностей.

С наступлением XX века пришло время модернизма во всех видах искусства. Творческие поиски привели к необходимости перенести знания пространственной геометрии на архитектурные чертежи и строительную площадку. Мастера инженерно-архитектурной мысли, такие как первопроходцы модернизма Фрэнк Ллойд Райт, Рихард Нойтра, Ле Корбюзье, Алвар Аалто, Оскар Нимейер и наши современники Цезарь Пелли, Норман Фостер, Заха Хадид обратились к нестандартным линейчатым поверхностям – торсам, цилиндриодам, коноидам, геликоидам, гиперболическим поверхностям и др. Последние оказались одними из наиболее интересных, так как они сочетают в себе уникальные свойства, оригинальный и приятный глазу вид, а также простоту организации каркаса, что позволяет использовать их в архитектурной практике.

Гипербола – геометрическое место точек на плоскости, для которых разность расстояний до двух точек, называемых фокусами, постоянна. При вращении гиперболы вокруг мнимой оси получаем однополостный гиперболоид, а при вращении вокруг действительной – двуполостный. При таком определении двуполостный гиперболоид представляет собой две отдельные поверхности [1].

Меридианом и очерковой линией однополостного гиперболоида является гипербола. Диаметр горла поверхности вращения равен длине большой оси гиперболы. В большинстве случаев в архитектуре и строительстве эта поверхность ограничивается двумя окружностями – сечениями плоскостями, перпендикулярными оси вращения. Чаще всего эти плоскости расположены на разном расстоянии от горловины, чтобы радиусы сечений отличались и относились друг к другу по канонам «золотого сечения».

Одним из интересных свойств однополостного гиперболоида является то, что он является не только поверхностью вращения, но и дважды линейчатой поверхностью. Она образуется вращением вокруг оси скрещивающейся с ней прямой. Поверхность называется дважды линейчатой, потому что прямая, проведенная через любую точку образующей, расположенная под тем же углом к оси, на том же расстоянии от нее и не совпадающая с ней, также представляет собой образующую данной поверхности. Это свойство позволяет создавать строительные конструкции из прямых балок [1].

Гиперболоидная башня авторства В.Г. Шухова – самый известный пример применения однополостного гиперболоида на практике. Башня в Полибино стала первой в мире гиперболоидной конструкцией и вошла во все учебники по архитектуре и строительным конструкциям. Сооружение было построено для Всероссийской промышленной и художественной выставки в Нижнем Новгороде. Форму, которую имеет эта башня, ввел в архитектуру сам В.Г. Шухов (патент Российской Империи № 1896; от 12 марта 1899 года). Имя В.Г. Шухова в народе ассоциируется исключительно с упомянутой «шуховской башней», однако этот великий инженер разработал множество других инженерных объектов и решений. Например, при увеличении высоты башни, чтобы сохранить ритм пересечений стержней, приходится увеличивать их количество. Однако, есть и другой выход – увеличивая высоту, ставить один гиперболоид на другой. Впервые эту идею В.Г. Шухов реализовал в 1911 г. при строительстве двухъярусной водонапорной башни в Ярославле (общая высота 39,5 м) [2].

Жесткость гиперболоидным башням придают не только специальные кольца жесткости, но и соединение стержней между собой. На практике балки чаще всего свариваются между собой в местах пересечений. Но конструкция все равно сохранит жесткость, даже если стержни будут закреплены лишь с двух концов и даже шарнирно. Причина, по которой балки сооружений все же свариваются между собой, – исключение вероятности потери устойчивости стержня в сжатом состоянии. Чтобы обеспечить правильную работу конструкции с учетом этого факта, необязательно скреплять стержни во всех точках пересечения. Конечное решение принимается инженером исходя из данных конкретного проекта.

Отдельного упоминания заслуживают два способа организации каркаса. В первом случае образующие каркаса не являются едиными стержнями, а собираются из более коротких элементов. Это делается для того, чтобы стала возможной их сварка «встык». Такую разновидность гиперболоидного каркаса мы видим в башне города Кобе, Япония. Во втором случае стержни свариваются «внахлест». Примеры – башня в Полибино, Аджигольский маяк на Украине. Кроме того, этот вид каркаса выгоден и при постройке сооружений небольшой высоты, так как каждая образующая каркаса может быть выполнена в виде единого стержня. Такую конструкцию легко монтировать, закрепив один конец балки на фундаменте и поднимая другой с помощью подъемного крана. В польском г. Цыхануве подобным образом устроена необычная водонапорная башня. Гиперболоидная конструкция шуховского типа поддерживает бак для воды в форме тора. Как видно на этом примере, описанная технология настолько рациональна, что ей нашли применение даже в таком обыденном сооружении, как водонапорная башня. Примечательно, что диаметр сечения основания меньше, чем у вершины сооружения.

Основа башни порта в г. Кобе (рис. 1) – центральный железобетонный стержень с обзорной площадкой большего диаметра вверху. Оболочка, несущая часть нагрузки и придающая сооружению жесткость и устойчивость выполнена в форме однополостного гиперboloида. Каркас выполнен на основе двух семейств образующих и меридиан. Меридианы каркаса есть дополнительные кольца жесткости, приваренные в местах пересечения стержней. В нижней и верхней частях башни элементы каркаса имеют большую длину, поэтому для сохранения эстетичности было добавлено несколько промежуточных колец. Ночная подсветка башни подчеркивает её ажурный каркас.



Рис. 1. Башня порта в г. Кобе

В промышленном строительстве в форме однополостного гиперboloида чаще всего сооружают градирни – сооружения для охлаждения больших объемов воды направленным потоком атмосферного воздуха, например на АЭС, тепловых станциях, некоторых заводах. Если башня градирни имеет форму гиперболической оболочки, обеспечивается естественная тяга воздуха. Такая форма оптимальна и по условиям внутренней аэродинамики и устойчивости. Гиперboloидные градирни можно увидеть, например, на ТЭЦ-21 в Москве, атомной электростанции THTR-300 в Германии [3].

В 20-е годы прошлого века архитекторы-конструктивисты находились в постоянном поиске новых дизайнерских решений. Однако уровень развития строительной механики не позволял многим проектам воплотиться в жизнь. Именно тогда многие архитекторы буквально «зацепились» за гиперboloидную форму. Шуховская конструкция явилась неким компромиссом между замечательными конструктивными качествами и необычной для того времени формой. С одной стороны, сооружение из прямых балок легко рассчитывалось, с другой стороны оно было достаточно экстравагантно для наблюдателя. Казалось бы, с развитием строительной техники и появлением новых материалов гиперboloидная поверхность должна была полностью уступить место сетчатым оболочкам общей формы. И как мы видим на сегодняшний день, этого не произошло. Однополостной гиперboloид по-прежнему актуален как формообразующая поверхность в архитектуре. В рассмотренных примерах стержневая система позволяет раскрыть геометрические особенности используемой поверхности. Но уже к середине XX века она начинает использоваться по-другому. Например, построенный в 1963 году научный центр в Сент-Луисе, США покрыт сплошной бетонной оболочкой в форме однополостного гиперboloида. Однако арматурный каркас здания создан по той же шуховской схеме. Для всех подобных зданий это самое экономически рациональное решение [2].

Построенная в 2010 году гиперboloидная телебашня в Гуаньчжоу – вторая по высоте телебашня в мире – это ли не доказательство актуальности данной поверхности? Каркас оболочки сооружения состоит всего из одного семейства прямолинейных

образующих большого диаметра и еще из двух серий колец жесткости меньшей толщины. Эти элементы расположены согласно сечениям однополостного гиперboloида параллельными плоскостями. Описанные кольца имеют форму эллипса.

Форму однополостного гиперboloида могут иметь и всякие покрытия, например спроектированный знаменитым британским архитектором Норманом Фостером торговоразвлекательный комплекс «Хан-Шатыр» в Астане. Гиперboloидная форма сооружения продолжается от покрытия к первому этажу и далее распространяется на окружающий ландшафт. Оболочка поддерживается металлической ферменной конструкцией в области горловины поверхности.

В большинстве случаев каркас гиперboloидных оболочек создается из большого количества элементов, чтобы «сгладить» форму поверхности. Испанский архитектор Рикардо Бофиле решил отказаться от традиционного подхода и создал диспетчерскую башню в аэропорте Барселоны в минималистическом стиле. Количество железобетонных балок специально сведено к минимуму. Нужно признать, что оболочка получилась очень индивидуалистичной, ажурной.

Гиперboloический параболоид (гипар) – это седлообразная поверхность, определяемая в декартовых координатах уравнением:

$$z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}.$$

Гипар задается и кинематически двумя способами:

1) Движение прямолинейной образующей по двум прямолинейным направляющим с заданной плоскостью параллелизма. Интересно, что та же самая поверхность получится, если за направляющие выбрать прямые, проведенные через соответствующие концы отрезков, а плоскость параллелизма заменить на перпендикулярную. Таким образом, в гипаре присутствуют две группы перпендикулярных образующих.

2) Движение параболы с ветвями, направленными вверх по параболе с ветвями, направленными вниз при условии, что образующая касается направляющей только вершиной. Эти параболы называются главными.

Пусть поверхность задана вышеописанным уравнением. Тогда сечения гипара плоскостями, параллельными O_{xz} и O_{yz} есть параболы. Сечения плоскостями, параллельными O_{xy} – гиперболы с вершинами, лежащими на главных параболах. В случае самой плоскости Oxy гипербола вырождается в две пересекающиеся прямые [1].

Первым инженером, теоретически обосновавшим эффективность конструкции на основе гиперboloического параболоида, стала Т.М. Макарова. Это выдающееся изобретение было запатентовано в 1928 году в СССР. Т.М. Макарова представила две принципиальные схемы покрытия квадратного в плане помещения на основе гиперboloического параболоида, собиравшиеся только из прямых элементов. В первом случае оболочка имеет пирамидальную форму и опирается на весь периметр стен, во втором – покрытие куполообразное и поддерживается только по углам [4].

Оболочки в форме гиперboloического параболоида получили всемирное распространение лишь после окончания Второй мировой войны. В это время оболочки сооружались как из металла, так и из бетона путем монолитной заливки опалубки с прямыми стержнями арматуры без единого сгиба. Павильон «Космические лучи» для кампуса Национального Автономного Университета Мехико, разработанный выдающимся архитектором и конструктором Феликсом Канделой, стал первым сооружением с покрытием на основе гипара. В этом здании мы видим и продуманные пропорции, и четко выверенные параметры поверхности. Феликс Кандела внес значительный вклад в технологии расчета конструкций-оболочек, в частности оболочек двойной кривизны и гиперboloических параболоидов. Примечательно сооружение океанографического музея, в городе искусств и наук в Валенсии (рис. 2).

Форма здания музея образована серией отсеков гиперboloического параболоида. Параметры поверхности и расположение плоскостей сечения выбраны так, что эти отсеки, будучи соединенными вместе, образуют гладкую поверхность без изломов.

Покрытие причудливо выступает над стеклянным фасадом. Выступ создается сечением гипара наклонной плоскостью.

Конструкцию из четырех «лепестков» гиперболического параболоида мы видим в другом проекте Феликса Канделы – заводе по разливу рома «Бакарди» в пригороде Мехико Куаутитлане. Известно, что при определенных условиях отсек поверхности сохраняет механико-геометрические свойства исходной поверхности. Именно это свойство позволяет опереть четырехчастную структуру покрытия завода лишь в четырех точках так же, как это возможно и для самого гипара.



Рис. 2. Океанографический музей в г. Валенсия

Одним из непростых решений, стоящих перед проектировщиками, работающими с гиперболическими оболочками, является выбор материала для покрытия каркаса. Оригинальный выбор сделали архитекторы Элизабет Диллер и Рикардо Скофидио при разработке павильона «Гипар» Линкольн-центра в Нью-Йорке. На крыше в форме гипара расположился газон, на котором могут отдохнуть посетители.

По всему миру разбросано большое количество стадионов с крышей в форме гиперболического параболоида. Например, Saddledome в канадском Калгари, небольшой стадион в минском парке Горького, открытый к Олимпийским играм 1967 года Дворец спорта в Гренобле, крытый каток в г. Коломне. Благодаря такой форме крыши, на стадионе можно устроить как низкие, так и высокие трибуны.

Рассмотрев особенности и свойства гиперболических поверхностей, можно сделать вывод, что они очень удачно подходят для использования в архитектуре и строительстве. Применение гиперболических поверхностей в строительном деле стало революцией и большим техническим прорывом. Обобщим самые важные их свойства.

Во-первых, они приятны человеческому глазу. Общеизвестно, что человек лучше всего воспринимает простые формы и поверхности. Ажурный каркас башни на основе однополостного гиперболоида, масштабные шатровые конструкции, необычная форма оболочки на основе гиперболического параболоида очень эффектно смотрятся, а также гармонично вписываются в окружающий ландшафт.

Во-вторых, геометрические свойства этих поверхностей обосновывают их конструкционные качества. Возможность создания каркаса из прямых балок – самая главная особенность сооружений на основе гиперболических поверхностей.

В-третьих, почти все поверхности, которые образуются в результате пересечения гиперболических поверхностей с другими поверхностями, сохраняют их свойства – жесткость и прочность. По этой причине в одном сооружении можно сочетать разные виды поверхностей.

Список библиографических ссылок

1. Дыховичный Ю.А. Современные пространственные конструкции. – М.: Высш. шк., 1991. – 543 с.

2. Хан-Магомедов С.О. Архитектура советского авангарда, Кн. 1. Проблемы формообразования. Мастера и течения. – М.: Стройиздат, 1996. – 715 с.
3. Абрамов Н.Н. Водоснабжение. Стройиздат, 1974. – 371 с.
4. Макарова Т.М. Патент на изобретение «Перекрытие помещений», № 5568. 30 марта, 1925.
5. Феликс Кандела. URL: <http://www.liveinternet.ru> (дата обращения: 9.04.2014).
6. Аристова Л.В., Быкова Г.И. Физкультурно-спортивные сооружения. Деревянные клееные конструкции. – М.: Изд-во «СпортАкадемПресс», 1999. – 536 с.
7. Бартонов Н.Э., Чернов И.Е. Архитектурные конструкции. – М.: Высш. шк., 1974. – 320 с.
8. Савельев А.А. Конструкции крыш. Стропильные системы. – М.: Аделант, 2009. – 119 с.

Akhmetzyanov R.I. – student

E-mail: nrustem@bk.ru

Danchenko L.V. – senior lecturer

E-mail: d9700@yandex.ru

Rybalkina R.I. – senior lecturer

E-mail: pr1948@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Geometric and structural features of hyperboloid structures

Resume

Since the XXth century till present, in architecture and construction hyperbolic surfaces have been often used. Hyperbolic surfaces are surfaces which have an infinite number of sections forming the hyperbole.

Humanity has accumulated rich experience in the use of these surfaces as basic formation of the entire structure and its individual parts. Rationality of design based on hyperbolic surfaces was proved long ago, and in this regard one can see how often they are used in the coatings of individual and large span structures.

On the basis of the one-sheet hyperboloid tent structures are built, such as the Khan Shatyr in Astana, high-rise buildings of various types – television towers, such as in Guangzhou, China. Hyperboloids have a potential to be used as a spatial coverings. This is hanging membrane kind of structures, coverings of sports facilities (the ice rink Saddledome in Calgary, Canada), public buildings (the airport in St. Louis, the USA).

Keywords: hyperbolic paraboloid, one-sheet hyperboloid, hyperboloid structures, shell, television tower, rod design.

Reference list

1. Dykhovichny Y.A. Modern dimensional structures. – М.: Higher school, 1991. – 543 p.
2. Khan-Magomedov S.O. Architecture of the Soviet Avant-Garde, Book 1. Problems of Forming. Masters and Trends. – М.: Stroizdat, 1996. – 715 p.
3. Abramov N.N. Water Supply. Stroizdat, 1974. – 371 p.
4. Makarova T.M. Patent for the Invention «Facility Floors» № 5568. March 30, 1925.
5. Felix Candela. URL: <http://www.liveinternet.ru> (reference date: 9.04.2014).
6. Aristova L.V., Bykov L.V. Sports Facilities. Wooden Glued Constructions. – М.: Publishing house «SportAcademPress», 1999. – 536 p.
7. Barton N.E., Chernov I.E. Architectural structures. – М.: Higher school, 1974. – 320 p.
8. Saveliev A.A. Roof constructions. Truss systems. – М.: Adellant, 2009. – 119 p.