

Применение геометрии гиперboloида вращения в строительстве на примере башни Шухова

А.К. Уразаев, В. Дияб, М.Х.А. Нашер, М.М.А. Уваис

Российский университет дружбы народов, Москва

Аннотация: В данной работе рассматривается геометрия гиперboloида вращения как одного из наиболее выразительных и функциональных объектов среди поверхностей второго порядка. Подробно анализируются его инженерные и архитектурные особенности, обуславливающие возможность создания прочных, лёгких и экономически эффективных конструкций. Особое внимание уделено однополостному гиперboloиду, обладающему уникальными геометрическими и механическими свойствами, позволяющими использовать его в качестве несущего каркаса сложных сооружений. Приводится классификация и описание поверхностей второго порядка, подчёркиваются их характеристики с позиции архитектурного применения. В качестве примера исследуются конструктивные и технологические аспекты проектирования и возведения гиперboloидных сооружений на примере Шуховской башни в Москве. Отмечается значительная роль гиперboloидной геометрии в развитии инженерной мысли и архитектуры XX века, а также её вклад в формирование современного подхода к проектированию эффективных пространственных конструкций.

Ключевые слова: гиперboloид, поверхность второго порядка, гиперboloид вращения, инженерная конструкция, архитектурная форма, Шуховская башня, стальная структура, пространственная решётка, конструктивная технология, сетчатая оболочка.

Введение

С древнейших времен человечество возводило жилища, разнообразие форм которых простиралось от простейших куполообразных шалашей до примитивных хижин с прямыми стенами и скатами крыш, а впоследствии — от плоских панельных сооружений прямоугольного параллелепипеда до современных спиралевидных небоскребов. Архитектурные конструкции эволюционировали, изменяясь по функциональности и геометрии. Их поверхности классифицируют на первого и второго порядка: первые — линейные и плоские, вторые — более сложные, с криволинейной и объемной формой. С течением времени геометрия архитектурных форм становилась всё более разнообразной, отражая рост инженерной мысли.

Поверхности второго порядка

Поверхности второго порядка задаются квадратичными уравнениями (1) и имеют сложные формы:

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Exz + Fyz + Gx + Hy + Iz + J = 0 \quad (1)$$

где хотя бы один из коэффициентов A, B, C, D, E, F не равен нулю.

К примеру, если $A=2$, $B=3$, $I=-4$, $C=D=E=F=G=H=J=0$, то на рис.1 получится эллиптический параболоид.

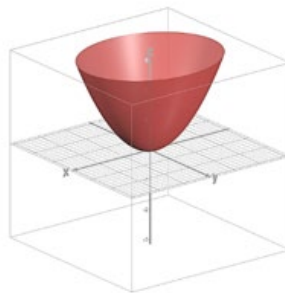


Рис. 1. – Эллиптический параболоид, заданный квадратичным уравнением $2x^2+3y^2-4z=0$

Один из типов поверхностей второго порядка – это гиперboloид вращения. Гиперboloид в свою очередь может быть однополостный или двуполостный. Однополостный гиперboloид вращения состоит из одной полости, напоминающий форму “песочных часов” (рис.2). Ее можно получить путем вращения гиперболы вокруг её мнимой оси. Уравнение (2) [1] в канонической форме выглядит следующим образом:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (2)$$

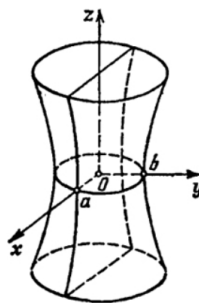


Рис. 2. – Сечение однополостного гиперboloида [2]

Гиперболоид вращения

Однополостный гиперболоид открыл новые возможности в архитектуре и инженерии. Линейчатая структура, прочность и экономичность сделали его основой для эстетически выразительных и технически эффективных сооружений. Это обеспечило гармоничное сочетание формы и функции в реализации инновационных проектов.

Однополостный гиперболоид относится к дважды линейчатым поверхностям, через каждую точку которых проходят две прямые, полностью лежащие на поверхности (рис.3). Эти прямые (образующие) пересекаются в данной точке, придавая поверхности характерные геометрические и механические свойства.

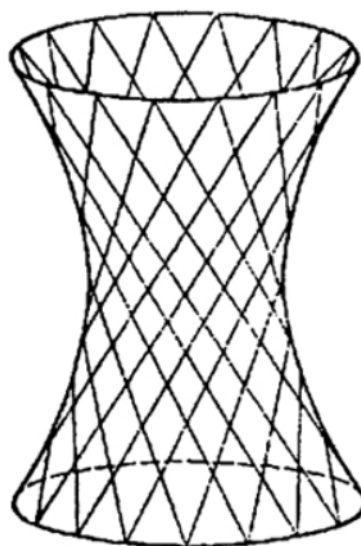


Рис. 3. – Образующие однополостного гиперболоида [2]

Отличительной особенностью гиперболоидных конструкций является возможность их сооружения из прямолинейных балок, несмотря на внешнюю кривизну. Благодаря сетчатой структуре они устойчивы к ветровым нагрузкам, прочны и экономичны (рис.4). Жесткость обеспечивается кольцами и узловыми соединениями, чаще всего сварными. Даже при шарнирных креплениях конструкция сохраняет устойчивость, так как

геометрия поверхности способствует равномерному распределению нагрузок.

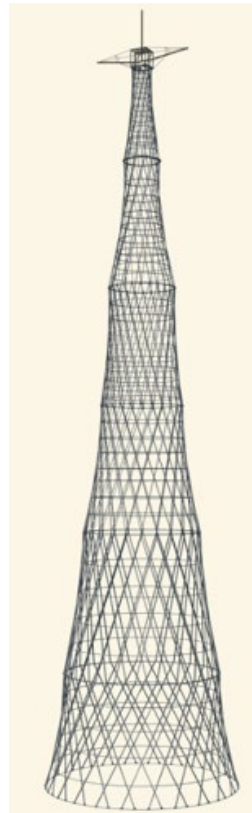


Рис. 4. – Башня в форме гиперboloида вращения В.Г. Шухова [3]

Для предотвращения потери устойчивости стержней при сжатии применяется их сварка в узлах. Однако полное скрепление не всегда необходимо — способ соединения определяется проектировщиком по результатам расчетов [4,5].

Каркасы формируются двумя способами:

1) Сборка из отдельных элементов — предполагает использование коротких сегментов и требует стыковой сварки для создания цельной конструкции [4,5].

2) Соединение внахлест — эффективно для невысоких сооружений, где применяются цельные стержни. Монтаж упрощается фиксацией одного конца балки и подъёмом другого [4,5].

Гиперболоидные формы широко применяются в строительстве благодаря уникальной геометрии, сочетающей прочность, экономичность и выразительность.

Башня Шухова

В 1922 году в Москве Владимир Григорьевич Шухов построил Шуховскую башню — знаковый объект культурного наследия России и выдающийся пример гиперболоидной конструкции. Башня высотой 150 метров (рис.5) изначально задумывалась как 350-метровое сооружение, способное превзойти Эйфелеву башню, однако из-за гражданской войны и нехватки металла проект был сокращён [6,7]. Несмотря на это, башня продемонстрировала преимущества гиперболоидных сетчатых башен — высокую прочность, устойчивость и экономию материалов. Построенная из прямых стальных элементов, соединённых в диагональную сетку, она стала международно признанным образцом инженерного новаторства и повлияла на развитие аналогичных конструкций по всему миру [8].

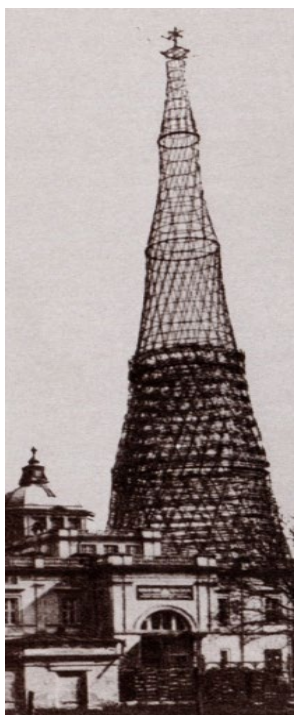


Рис. 5. – Шуховская телебашня [6]

Процесс строительства Шуховской башни включал несколько этапов, каждый из которых отличался высокой точностью и требовал нестандартных инженерных решений. Все элементы изготавливались централизованно на заводе, где выполнялись предварительная сборка и калибровка. Стальные кольца и балки проектировались с минимальными допусками, что обеспечивало точное сопряжение узлов на месте и снижало вероятность ошибок при монтаже [9].

Основу методики составила оригинальная технология, предложенная Шуховым, — телескопическая сборка. Конструкция монтировалась поэтапно: каждый ярус поднимался с помощью лебёдок и временных опор, затем фиксировался (рис.6). Работы начинались с установки базового кольца, от которого расходились балки первого уровня. Монтаж продолжался без применения массивных лесов или тяжёлой техники, что ускорило строительство и повышало его технологическую эффективность [10,11].

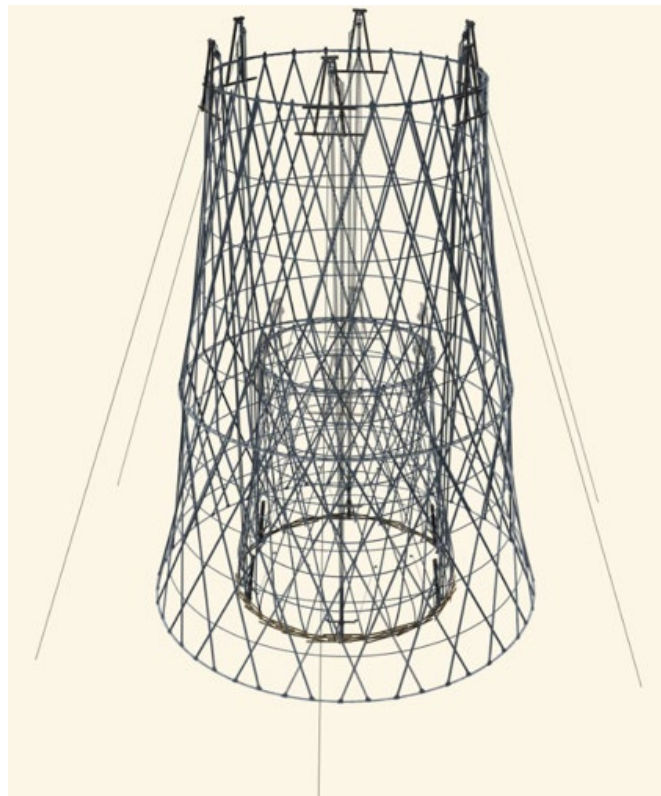


Рис. 6. – Поэтапное возведение башни Шухова [3]

При возведении Шуховской башни произошёл технический сбой: при подъёме четвёртой секции оборвался несущий трос, что привело к частичному разрушению ранее смонтированных уровней (рис.7). Причиной стал эффект усталости металла — накопление внутренних дефектов под действием повторных нагрузок, снижающее прочность стали в уязвимых зонах конструкции [12].

Ситуацию осложнило некорректное проектирование временных опор, не рассчитанных на длительное воздействие переменных нагрузок, что вызвало их перегрузку. Монтаж сопровождался неравномерным распределением напряжений и локальными деформациями. Дополнительные факторы — дефицит качественных материалов, отсутствие инструментов для контроля состояния конструкций и неоднородность металла — повысили риск разрушения, приведшего к частичному обвалу [13].

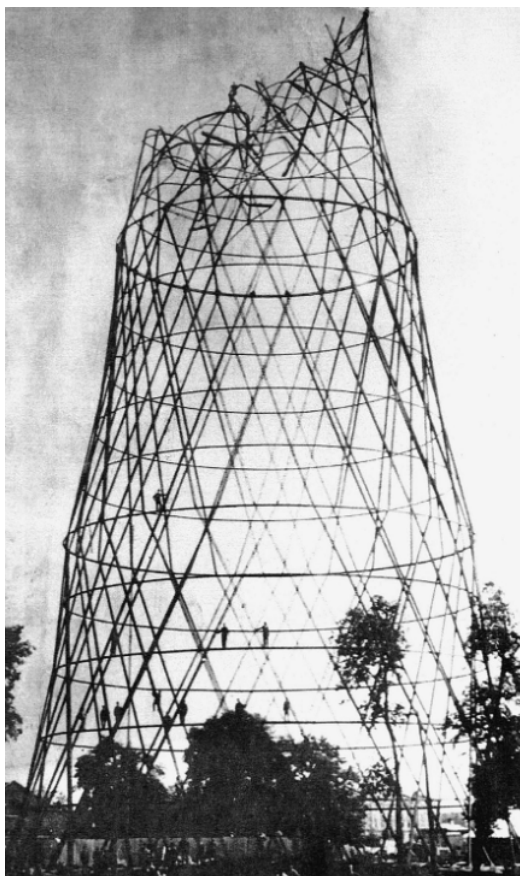


Рис. 7. – Последствия обрушения четвертого яруса башни [14]

Московская Шуховская башня — редкий пример соединения инженерной точности и архитектурной выразительности. Проект, основанный на принципе геометрической рациональности, обеспечивал равномерное распределение нагрузок за счёт гиперboloидной формы. Такая конструкция сочетает лёгкость, прочность и устойчивость к внешним воздействиям. Впервые удалось минимизировать расход материалов без потери прочности благодаря эффективному использованию свойств стали [15].

Инженерные решения, реализованные в этом проекте, стали основой для многих последующих разработок. Технология гиперboloидной оболочки нашла применение в радиобашнях, антеннах и космической технике, подтвердив универсальность подхода Шухова, который используется и в современных сооружениях — от мостов до небоскрёбов.

Башня представляет интерес и для научных исследований в архитектурной механике и материаловедении. Сетчатая конструкция наглядно демонстрирует возможности стали при создании прочных и лёгких объектов, стимулируя развитие новых проектных и технологических направлений.

Заключение

Геометрия гиперboloида вращения в строительной практике представляет собой не только выдающееся инженерное достижение, но и ключевой этап в эволюции архитектурной формы. Она подчёркивает значимость инновационного подхода к решению технических задач и стимулирует развитие современных конструктивных решений и технологий применения строительных материалов. Такие сооружения остаются источником вдохновения для специалистов и широкой публики, демонстрируя гармоничное единство инженерной рациональности и архитектурной выразительности на основе передовых научных принципов.

Литература

1. Рачковская Г.С. Математическое моделирование кинематических линейчатых поверхностей на основе однополостного гиперболоида вращения в качестве неподвижного и подвижного аксоидов // Инженерный вестник Дона. 2013. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1499.
2. Бугров Я.С. Никольский С.М. Высшая математика: Учебник для вузов. В 3 томах. Т. 1. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии. Москва: Дрофа, 2004. 146 с.
3. Ажурная башня // Математический этюд URL: etudes.ru/etudes/shukhov-tower/.
4. Курц, М. А., Слепынина Т. Н. Применение гиперболоидных конструкций в строительстве // Молодежь и наука : материалы международной научно-практической конференции старшеклассников, студентов и аспирантов (26 мая 2023 г., г. Нижний Тагил). Нижний Тагил: Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета, 2023. С. 140-143.
5. Багдасарьян Н.Г., Гаврилина Е.А. Гений В. Г. Шухова и современная эпоха. Москва: Материалы междунар. конгресса. Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 319 с.
6. Шухова Е.М. Владимир Григорьевич Шухов. Первый инженер России. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 366 с.
7. Рудин А.В. Владимир Григорьевич Шухов. К 150-летию со дня рождения МГТУ им. Н. Э. Баумана. Москва: Международный и Российский Союзы научных и инженерных общественных объединений, 2002. 70 с.

8. Рачковская Г.С. Математическое моделирование и компьютерная визуализации сложных геометрических форм // Инженерный вестник Дона. 2013. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1498.

9. Щуцкий С.В., Черныш А.В., Болдырев А.С. Особенности расчета башен в форме сетчатого гиперboloида // Инженерный вестник Дона. 2019. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5777.

10. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Аналитические поверхности в архитектуре здания: конструкций и изделий: Монография. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. 328 с.

11. Кривошапко С.Н. Коноидальные оболочки // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1998. № 6. С. 22-24.

12. Арнаутов Л. И., Карпов Я. К. Повесть о великом инженере. Москва: Московский рабочий, 1978. 288 с.

13. Кузнецов В.В. Справочник проектировщика Т.3. - М.: АСВ, 1999.-528 с.

14. Шухова Е.М. Трагедия Шуховской башни : о судьбе творческого наследия выдающегося русского инженера и ученого Владимира Григорьевича Шухова (1853-1939) // История государства Российского. Москва: Московский журнал, 2014. С. 30-36.

15. McHenry D.A. A lattice analogy for the solutions of plane stress problems // J. Inst. Civ. Eng., 1943, 21, pp. 59-82.

16. Алямовский А.А. Solidworks/CosmosWorks: инженерный анализ методом конечных элементов. - Москва: ДМК, 2004. 432 с.

References

1. Rachkovskaya G.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №1. URL: ivdon.ru/en/magazine/archive/n1y2013/1499.

2. Bugrov Ya.S. Nikol'skij S.M. Vy'sshaya matematika: Uchebnik dlya vuzov. V 3 tomax. T. 1. E'lementy` linejnoy algebrы` i analiticheskoy geometrii [Higher

Mathematics: Textbook for Universities. In 3 volumes. Vol. 1. Elements of Linear Algebra and Analytical Geometry]. Moskva: Drofa, 2004. 146 p.

3. Azhurnaya bashnya. Matematicheskij e`tyud [An openwork tower. Mathematical sketch]. URL: etudes.ru/etudes/shukhov-tower/.

4. Kurcz, M. A., Slepynina T. N. Primenenie giperboloidny`x konstrukcij v stroitel`stve [Application of hyperboloid structures in construction]. Molodezh` i nauka: materialy` mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii starsheklassnikov, studentov i aspirantov (26 maya 2023 g., g. Nizhnij Tagil). Nizhnij Tagil: Nizhnetagil`skij tehnologicheskij institut (filial) Ural`skogo federal`nogo universiteta, 2023. pp. 140-143.

5. Bagdasar`yan N.G., Gavrulina E.A. Genij V. G. Shuxova i sovremennaya e`poxa. Moskva [Shukhov and Modern Engineering. G. Shukhov and modern epoch. Moscow]: Materialy` mezhdunar. kongressa. Izd-vo MGTU im. N. E`. Baumana, 2015. 319 p.

6. Shuxova E.M. Vladimir Grigor`evich Shuxov. Pervy`j inzhener Rossii [The First Engineer of Russia]. Moskva: MGTU im. N. E`. Baumana, 2003. 366 p.

7. Rudin A.V. Vladimir Grigor`evich Shuxov. K 150-letiyu so dnya rozhdeniya MGTU im. N. E`. Baumana [To the 150th Anniversary of the Birth of N.E. Bauman]. Moskva: Mezhdunarodny`j i Rossijskij Soyuzy` nauchny`x i inzhenerny`x obshhestvenny`x ob`edinenij, 2002. 70 p.

8. Rachkovskaya G.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №1. URL: ivdon.ru/en/magazine/archive/n1y2013/1498.

9. Shhuczkij S.V., Cherny`sh A.V., Boldy`rev A.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5777.

10. Krivoshapko S.N., Mamieva I.A. Analiticheskie poverxnosti v arxitekture zdaniij: konstrukcij i izdelij: Monografiya [Analytical surfaces in the architecture of buildings: structures and products: A monograph]. Moskva: Knizhny`j dom «LIBROKOM», 2012. 328 p.



11. Krivoshapko S.N. Konoidal'nye obolochki [Conoidal shells]. Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve. 1998. № 6. pp. 22-24.
12. Arnautov L. I., Karpov Ya. K. Povest' o velikom inzhenere [The Tale of the great engineer]. Moskva: Moskovskij rabochij, 1978. 288 p.
13. Kuzneczov V.V. Spravochnik proektirovshhika T.3 [The designer's Handbook Vol. 3]. Moskva: ASV, 1999.-528 p.
14. Shuxova E.M. Istoriya gosudarstva Rossijskogo. Moskva: Moskovskij zhurnal, 2014. pp. 30-36.
15. McHenry D.A. A lattice analogy for the solutions of plane stress problems. J. Inst. Civ. Eng., 1943, 21, pp. 59-82
16. Alyamovskij A.A. Solidworks/CosmosWorks: inzhenerny`j analiz metodom konechny`x e`lementov [Solidworks/COSMOSWorks: engineering analysis by the finite element method]. Moskva: DMK, 2004. 432 p.

Дата поступления: 4.05.2025

Дата публикации: 26.06.2025