

КРИВОШАПКО С.Н.

ПРИМЕНЕНИЕ КОНОИДА И ЦИЛИНДРОИДА ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОБОЛОЧЕЧНОГО ТИПА

Среди десятков известных линейчатых поверхностей, которые можно приять за срединные поверхности оболочек, находят применение линейчатые поверхности нулевой гауссовой кривизны: цилиндрические, конические и реже торсовые, а также линейчатые поверхности отрицательной гауссовой кривизны: однополостные гиперболоиды, гипары, коноиды и реже цилиндроиды. Наибольшее распространение в современном строительстве получили круговые и параболические цилиндрические и конические поверхности, однополостные гиперболоиды вращения и гипары благодаря хорошо изученной геометрии их формы, существованию методов их расчета на прочность, устойчивость и динамику и их востребованности для практических нужд. Однако не прекращаются теоретические исследования и коноидальных оболочек, поиск возможностей их оптимального применения. Некоторые новые сведения по расчету прямых коноидальных оболочек на прочность, определению их частот собственных колебаний, знаковые примеры их применения для шедовых покрытий промышленных предприятий, для крыш частных вилл и общественных зданий, летних театров и музеев, в современных скульптурных комплексах приводятся в представленном обзоре. Показано, что в меньших масштабах, но продолжается проектирование и строительство коноидальных оболочек в 2000-2017 годах

Вся основная приведенная библиография датируется XXI веком.

Ключевые слова: линейчатая поверхность, коноид, цилиндرويد, коноидальная оболочка, статический расчет, собственные колебания.

Введение

В настоящее время известны, описаны и рекомендованы для внедрения сотни геометрических прототипов геометрических форм сооружений [1], но применяются на практике только десяток поверхностей [2]. Конечно, оболочки в форме коноидов и цилиндроидов применяются намного реже, чем конические, сферические, зонтичные оболочки [3] или параболические оболочки вращения [4], оболочки в форме однополостного гиперболоида [5] и ряд других [6].

При подготовке этого обзора автор встретил два взаимно противоположных утверждения: первое состоит в том, что коноидальные оболочки только сейчас нашли ограниченное применение в реальных конструкциях и сооружениях, а второе говорит, что эти оболочки пользовались популярностью только до середины прошлого века. Автор не согласен ни с одним из этих утверждений, а считает, что истина находится посередине. Просто надо помнить, что после 1965 г. бум строительства большепролетных железобетонных оболочек начинает затихать, т.е. закончилась эпоха «золотого века тонких оболочек» (1922-1965). Строятся только функционально необходимые оболочки, например градирни, или оболочки, являющиеся дополнением к основному сооружению.

Впервые наиболее полная информация о возможностях применения коноида применительно к архитектуре зданий и конструкций была дана в статье [7] с 40 наименованиями использованной литературы, где приведено несколько примеров реальных коноидальных конструкций и приведена хронология развития методов статического и динамического расчета этих оболочек. Затем в работе [8] уже с 65 наименованиями использованной литературы количество реальных примеров коноидов и цилиндроидов было увеличено. В табл. 1 перечислены объекты в форме коноидов и цилиндроидов, упомянутые в работах [7, 8].

Отметим также, что впервые коноидные оболочки появились во Франции, затем в Чехословакии, Италии и особенно Польше, благодаря В. Залевскому, который ими занимался.

Таблица 1 – Здания, сооружения и конструкции в форме коноидов и цилиндридов

Название	Город	Страна	Авторы	Построен в
Коноидальная шедовая оболочка		Франция	Э. Фрейсине	1928 г.
Локомотивное депо		Румыния		
Католический собор		Канада		
Католический собор	Орс	Дания		
Временная детская школа	Барселона	Испания	А. Гауди	1909-1936 г., перестроена в 2002 г.
Шедовое покрытие		Болгария	И. Доганов	1955 г.
Склад для хранения соли		Чехословакия	арх. Рубан	
Открытый товарный склад	Мехико	Мексика	арх. Кандела и Рекамье	1952г.
Козырек здания	Мехико	Мексика	арх. Кандела и Прието	1955 г.
Навесы в Оклендском международном аэропорту	Oakland, Калифорния	США		

Определения и описания поверхностей

Коноид – поверхность Каталана, все прямолинейные образующие которой пересекают фиксированную прямую – *ось коноида* [9]. *Поверхность Каталана* – линейчатая поверхность, прямолинейные образующие которой параллельны одной и той же *плоскости параллелизма*.

Таким образом, коноид – это линейчатая поверхность (рис. 1), образованная движением прямой, которая остается параллельной фиксированной плоскости P , пересекает неподвижную прямую AB (ось коноида) и неподвижную направляющую кривую C . Предполагается, что прямая AB не пересекает кривую C , но пересекает плоскость P . Простейшим коноидом является *гиперболический параболоид*, который образуется прямой, которая движется по двум скрещивающимся прямым, оставаясь параллельной неподвижной плоскости. В некоторых публикациях коноиды называют *клиновидными поверхностями*.

Коноид, у которого фиксированная прямая (ось) перпендикулярна плоскости параллелизма, называют *прямым коноидом*. Ось прямого коноида есть *стрикционная линия*. *Прямой геликоид* есть прямой коноид [10]. Прямой коноид впервые в практике был использован А. Гауди и поэтому архитекторы иногда называют ее *поверхностью Гауди* [11]. Само формирование коноидов содержит источник архитектурного разнообразия.

В настоящее время, известны 12 коноидальных поверхностей [1, 9]: прямой винтовой коноид (прямой геликоид), непрерывно-топографическая линейчатая поверхность с распределяющим эллипсом, параболической коноид (рис. 2), коноид с направляющей окружностью, коноид с направляющей цепной линией, прямой синусоидальный коноид (рис. 3), прямой коноид с направляющей параболой, ось которой параллельна оси коноида; коноид Плюккера, коническая кромка Уоллиса, коноид Циндлера, эвольвентный коноид и гипар (гиперболический параболоид).

В работе [12] предлагается разделить коноидальные поверхности на три типа: коноиды Плюккера, коноиды Купера (the Küper conoids) и коноиды Вивиани (the Viviani conoids).

По геометрии, расчету на прочность, устойчивость, колебания и применению оболочек в форме прямого геликоида [8, 10] и гиперболического параболоида написаны сотни научных статей, монографий и диссертаций, поэтому мы остановимся только на применении оставшихся десяти коноидальных поверхностей.

Цилиндронид – линейчатая поверхность, образованная движением прямолинейной образующей по двум криволинейным направляющим, причем во всех положениях образующая прямая параллельна некоторой *плоскости параллелизма* [13]. Цилиндрониды являются поверхностями отрицательной гауссовой кривизны ($K < 0$), поэтому их нельзя развернуть на плоскость без разрывов и складок [14]. Они принадлежат к семейству *поверхностей Каталана*. Цилиндрониды, за исключением винтового цилиндрида (*прямого геликоида*) не могут иметь постоянную среднюю кривизну ($H \neq \text{const}$). *Цилиндрические поверхности* ($K = 0$) могут быть получены как частные случаи цилиндридов.

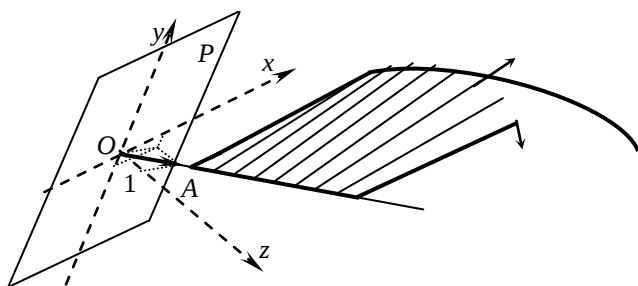


Рисунок 1 – Формообразование коноида

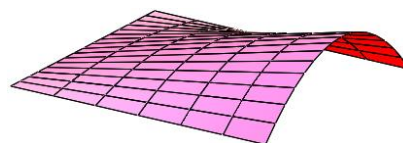


Рисунок 2 – Прямой параболический коноид

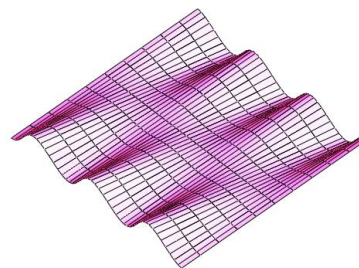


Рисунок 3 – Прямой синусоидальный коноид (две полости)

Цилиндроид, у которого одна из двух направляющих линий является прямой, называется *коноидом*. Таким образом, коноид является частным случаем цилиндриоида.

Винтовой цилиндриоид – поверхность, образованная прямой линией, которая движется в пространстве, параллельно плоскости параллелизма, все время пересекаясь с винтовой линией и касаясь поверхности прямого кругового цилиндра. Ось винтовой линии и цилиндра совпадают. Образующая прямая и ось скрещиваются под прямым углом, следовательно, плоскость параллелизма перпендикулярна оси

В настоящее время, известны 5 цилиндриоидов [1]: цилиндриоид с двумя направляющими эллипсами, цилиндриоид с двумя направляющими окружностями во взаимно перпендикулярных плоскостях, цилиндриоид Фрезера, цилиндриоид Болла, цилиндриоид с параболой и синусоидой на параллельных торцах.

Коноид в архитектуре



Рисунок 4 – Покрытие железнодорожной станции «Oxford Road Station», Манчестер, Англия, 1960

расходу железобетона менее экономичны, чем шеды из эллипсоидальных оболочек [16]. В коноидальных крышах второго типа ось коноида AB расположена вдоль координатной оси y (рис. 1). В коноидальных крышах третьего типа ось коноида расположена вне пределов крыши, т.е. один торец совпадает с направляющей кривой C (рис. 1), а противоположный торец очерчен кривой пересечения плоскости параллельной плоскости, в которой лежит кривая C , с коноидом.

Бывший президент Международной ассоциации пространственных конструкций (IASS) Г. Рюле (H. Rühle) предлагает ввести 4-й тип коноидальных крыш: короткие оболоч-

Три основных типа коноидальных крыш выделены в работе [15] на стр. 527 в зависимости от положения оси коноида. Первый тип – это шедовые покрытия промышленного назначения, которые дают возможность лучше освещать интерьеры помещений (рис. 4). Их форма обеспечивает удаление газа или задымления из перекрываемого участка, поэтому с конструктивной точки зрения коноидальные шедовые покрытия более рациональны, чем цилиндрические. Этим объясняется их довольно широкое применение в промышленном строительстве в первой половине XX-го века [8]. Однако шедовые покрытия, образованные поверхностью коноида, по

ки-коноиды размещены навстречу друг другу, благодаря чему повышается несущая способность покрытия.

Обычно проектируют коноидальные оболочки с пролетами от 12 м до 24 м и с отношением пролет – стрела подъема равным 2 : 1. Расчеты показывают, что пролет может достигать 60 м. В СССР, странах Восточной Европы, Франции и Италии коноидальные оболочки в 1950-60 годах широко использовались для покрытия промышленных зданий пролетом до 60 м. Эти оболочки – идеальная форма для зданий с консольными покрытиями.



а б в
Рисунок 5 – [11] Движущаяся скульптура «Волна» («Wave») в Далласе, США (а);
«Стена Наций» («the Nations Walls») перед Олимпийским спорткомплексом в Афинах (б);
the Bodegas Ysios winery building в Северной Испании (в)

Уже отмечалось ранее в статье, что А. Гауди был первым, кто применил поверхность коноида. Другой всемирно-известный испанский архитектор С. Калатрава распространил идею А. Гауди по применению синусоидального коноида на скульптуру «Волна», которую установили перед музеем в Далласе, США (рис. 5, а) в 2000 году. А в 2004 году та же идея была воплощена С. Калатравой в композиции «Стена наций», установленной перед Олимпийским спортивным комплексом в Афинах (рис. 5, б). Третий раз С. Калатрава использовал синусоподобный прямой коноид для покрытия здания в северной Испании (рис. 5, в).

Слабоволнистая коноидальная поверхность использована для покрытия зданий в Чешской Республике (Conoidally roofed buildings near Lipno nad Vltavou, the Czech Republic). Конек здания совпадает с прямой осью коноида. А 2 коноида образуют 2 ската крыши [11].

После А. Гауди синусоидальный коноид получил большую популярность среди архитекторов. Архитектор Дж. Грегори (Jules Gregory) в 1960 году построил даже личную резиденцию в Ламбертвилле (Lambertville, Нью-Джерси, США) в форме синусоидального коноида из дерева (рис. 6).



Рисунок 6 – Личная резиденция архитектора Дж. Грегори

Интересно поступил Г. Накашима (George Nakashima), сначала построив коноидальную крышу из фанеры (рис. 7) в 1956 году, а через некоторое время возвел дом с коноидальной крышей большего размера из железобетона (рис. 8), которая стала известна под названием «Коноидальная студия Георга Накашимы» (George Nakashima's Conoid Studio).

В качестве примера применения формы коноида можно привести покрытие лаборатории ассоциации «ТДА», которая расположена в Букингхамшире (Buckinghamshire) (рис. 9). Покрытие организовалось тремя коноидами. Около 1999 года это сооружение было разобрано для освобождения места для строительства других домов.

Другой уникальный пример использования формы прямого коноида в Англии - Oxford Road Station, Манчестер (рис. 4). Как и в случае с коноидальным покрытием лабора-

тории «TDA» это сооружение состоит из трех коноидов с несущими элементами из дерева. Построенная в 1958-1960 годах станция находится в хорошем состоянии и сейчас.



Рисунок 7 – Коноидальная крыша из фанеры



Рисунок 8 – Коноидальная студия [trystcraft.com], Vintage Modern Design



Рисунок 9 – Лаборатория «Timber Development Association», Tylers Green, Buckinghamshire, 1958



Рисунок 10 – Промышленное здание, Gossau, Швейцария

Несколько десятков деревянных шедовых коноидов, пропускающих северный свет, было построено в 1966 году в Нидерландах (the University of Delft). Они используются и сейчас.

Архитекторы Г. Данцейсен (Heinrich Danzeisen), Г. Возер (Hans Voser) и инженер Г. Госсдорф (Heinz Hossdorff) в 1954-1955 году разработали проект промышленного здания в форме системы усеченных коноидов (с осью коноида вне секции здания) (рис. 10), Gossau, Швейцария. Это здание стало известным тем, что коноиды опираются здесь не на угловые колонны, а на фундамент

на уровне земли.



Рисунок 11 – Dakshin Delhi Kalibari Temple, South Delhi, Индия



Рисунок 12 – Church at Atlantida, Uruguay

Современные формы в традиционную архитектуру храмовых сооружений народности хинди внесли проектировщики Сумит Гош (Sumit Ghosh) и Сучитра Гош (Suchitra Ghosh), используя железобетонные коноиды в конструкции верхней части храма Dakshin Delhi Kalibari Temple (рис. 11). Строительство было закончено в 1988 году. Коноиды позволили обеспечить удивительную акустику, хорошее мягкое освещение и естественную вентиляцию. В храме могут одновременно находиться около 300 посетителей.

У церкви в Атлантиде в 30 милях от Монтевидео (Уругвай) кирпичные стены толщиной 30 см вдоль длинных сторон в форме серии из десяти прямых параболических коноидов (рис. 12). Параболические направляющие кривые на уровне крыши формируют непрерывную кривую, напоминающую синусоиду. Окна расположены высоко в стенах. Верх волнистой стены армирован, низ стены на уровне земли совпадает с осью коноидальной поверхности. Все стены и крыша полностью

выполнены из кирпича, кладка армируется стальной проволокой диаметром около 3 мм (1/8 дюйма), где это необходимо по расчету. Кладка выполнялась на водостойком растворе. Стены вверху заканчиваются волнистой железобетонной балкой. Крыша состоит из двух слоев кирпича и заанкерована в балку на стене [17].

Бетонная стена в форме коноида применялась также на складе соли в Чехословакии [8], см. табл. 1.

Классический параболический коноид выбран для железобетонного покрытия Летнего театра в г. Szczecin, Польша, 1998. Модель покрытия в масштабе 1 : 100 была испытана в аэродинамической трубе на ветровую нагрузку в Техническом университете города Szczecin (рис. 13). Пролет реальной оболочки – 60,68 м, ее длина – 43,3 м, высота – 22,73 м, толщина – 8,5 см [18]. Уравнение срединной поверхности оболочки принято в виде:

$$z = 0,00091x(256 - y^2), z \geq -12,64 \text{ м.}$$

Иногда трудно найти коноид в форме существующего сооружения, как, например, в геометрических формах художественного музея Милуоки, США (рис. 14), архитектор С. Калатрава. Строительство музея закончено в 2001 году. Здесь два симметрично расположенных коноида имеют общую фиксированную прямую (прямая AB на рис. 1), а две кривых C (рис. 1) совпадают с левой и правой сторонами скульптурной композиции [19].

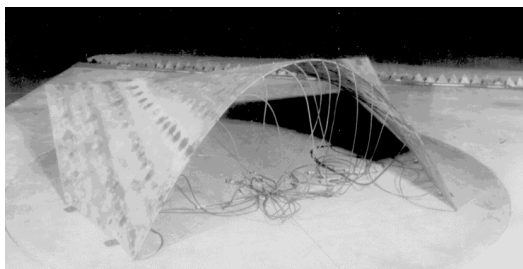


Рисунок 13 – Модель 1:100 летнего театра, Szczecin, Польша



Рисунок 14 – Художественный музей Милуоки, Lake Michigan, США

Коноидальная крыша выставочного центра в Валенсии, Испания, состоит из 20 модулей (рис. 15). Каждый модуль перекрывает 12 м × 9 м. Инновационное решение состоит в применении рифленого стального листа для покрытия одного модуля. Центр был построен в 2002-2004 годах, архитектор – Х. М. Т. Ллавадор (Jose Maria Tomas Llavador).

Идея архитекторов М. Бруера (Marcel Breuer), П. Нерви (Pier Luigi Nervi) и Б. Церфусса (Bernard Zehruss) применить комбинацию двух разных параболических коноидов и между ними цилиндрикоид (рис. 16) для устройства динамичного и грациозного консольного навеса перед входом в здание ЮНЕСКО (1953) в Париже затем неоднократно использовалась другими архитекторами.



Рисунок 15 – Коноидальная крыша выставочного центра в Валенсии, Испания



Рисунок 16 – Навес перед входом в одно из зданий ЮНЕСКО, Париж

Трудно перечислить все коноидальные сооружения, возведенные в разных странах. Некоторые из них очень похожи друг на друга, так как выполняют одни и те же функции. Например, приемный и складской корпус крытого рынка в Тулузе (Франция), построенный

по проекту инженера Прата. Рынок перекрыт конструкцией, состоящей из параболических железобетонных арочных ферм пролетом 20 м, со стрелой подъема 10 м и коноидных оболочек толщиной 70 мм, расстояние между арками - 7 м. Типичное шедовое покрытие. Или коноидальные оболочки над помещениями детских яслей в Пантене (Франция) напоминают форму синусоидальных коноидов.

Цилиндроид в архитектуре

Ф. Кандела в своих проектах использовал 9 типов поверхностей, в том числе, цилиндرويد (коноид). На рис. 17 показан его экспериментальный цилиндرويد, изготовленный в Мехико-Сити, Мексика, в 1950 году [20].



Рисунок 17 – Экспериментальный цилиндرويد



Рисунок 18 – Различные типы крыши из гофрированного металла в форме цилиндроидов, фирма Ishibashi, Tokugawa & Associates, Токио, Япония

Хорошо известная и престижная архитектурная фирма Ishibashi, Tokugawa & Associates создает в Японии выразительные сооружения. Расположенная в Токио команда из пяти архитекторов во главе с президентом фирмы Тошихико Ишибаши (Toshihiko Ishibashi) добилась признания в архитектурном мире и получила несколько призов за свою работу, в том числе, Awards for Merit for the “Chiba City Award for Excellence in Architecture” и “The AICA (Aica Kogyo Company, Limited) Jolypate Contest”. Эта фирма старается внести в японскую архитектуру элементы современных стилей. Ею предложены несколько типов легких крыш из гофрированного металла в форме цилиндроидов (рис. 18).



Рисунок 19 – The State Mosque of Negeri Sembilan, Малайзия

Серия пересекающихся цилиндрических элементов формирует мечеть, расположенную в 65 км к югу от столицы Малайзии. Проект мечети создали три молодых архитектора (Chen Voon Fee, Lim Chong Keat, and William Lim Siew Wai) из архитектурного бюро «Malayan Architects Co-Partnership», победившие в конкурсе среди дюжины других проектов. Жюри отметило, что проект выполнен в традиционном архитектурном стиле Малайзии, но в то же время он являлся инновационным проектом, как в конструкциях, так и в материале (рис. 19). Мечеть была торжественно открыта 24 ноября (пятница) 1967 года.

Цилиндроид применяется и в машиностроении [21, 22].

Некоторые сведения по расчету коноидальных оболочек на прочность, устойчивость и динамику

Как уже отмечалось научные работы, посвященные расчету коноидальных оболочек на прочность, устойчивость и динамику, приведены в обзоре [7]. Статья охватывает период до 1997 года. Теперь же рассмотрим период после 1997 года.

Из самых последних работ по статическому расчету укрепленных ребрами коноидальных оболочек отметим статьи [23-25], где рассмотрен расчет ребристой защемленной коноидальной оболочки с различным числом и различной ориентацией ребер. Восьмиузловой изопараметрический оболочечный конечный элемент был использован в работе [26] для изучения поведения композитной коноидальной оболочки с различными граничными условиями под действием равномерно распределенной поверхностной нагрузки, а в статье [27] описан статический расчет оболочки под действием сосредоточенной нагрузки. Есть исследование несущей способности поврежденной композитной коноидальной оболочки, проведенное МКЭ [28]. Приведенная библиография показывает, что наиболее интенсивные исследования коноидальных оболочек в настоящее время проводятся в Индии.

Другая серия работ посвящена свободным колебаниям коноидальных оболочек. Так статья [29] содержит полезную информацию о свободных колебаниях защемленной и свободно опертой оболочки с отсеченной осью коноида. Позже в 2005 году те же авторы с помощью МКЭ вычислили частоты свободных колебаний композитной оболочки с защемленными краями [30]. S.S. Nota и D. Chakravorty [31] изучали колебания коноидальных оболочек с отверстиями. Хотя можно привести для иллюстрации еще с десятка научных статей, посвященных колебаниям коноидальных тонких оболочек, но до сих пор некоторые практические задачи по свободным колебаниям ребристых оболочек еще не решены [31].

Заключение

В данный момент наблюдается некоторый спад в количестве проектируемых и возводимых сооружений – оболочек, несмотря на большое предложение со стороны архитекторов и математиков-геометров. В ряде случаев даже разбираются уже построенные оболочечные сооружения, чтобы освободить место для более доходных зданий. Но с появлением новых стройматериалов, новых программных комплексов, новых конструктивных решений должно произойти снижение строительных издержек, которое компенсирует удорожание земли под строительство.

Во всех университетах архитектурно-строительного направления обязательно рассказывается о линейчатых поверхностях отрицательной гауссовой кривизны – коноидах [32] и цилиндроидах [33], их возможностях в архитектуре. Это делается для того, чтобы показать молодежи как из довольно простой поверхности можно создавать архитектурные шедевры.

Установлено, что уже есть образцы применения полных и усеченных коноидных поверхностей в промышленных зданиях (шедовые покрытия), в храмовых сооружениях и в мечетях, в качестве стен складов и церкви, навесов перед входом, для перекрытия сцен летних театров, в скульптурных композициях и для украшения художественного музея и др. Их используют для крыш элитных коттеджей. Следовательно, можно заявить, что рассматриваемая линейчатая форма пользуется популярностью. И часто это получается неплохо, и с точки зрения архитектурной выразительности и с точки зрения заявленной функциональности.

Цель статьи – показать, на что способны коноидальные поверхности и цилиндроиды, как эта линейчатая поверхность в руках опытных архитекторов становится архитектурной достопримечательностью и знаковым сооружением города или архитектора.

Интенсивные экспериментальные и теоретические исследования коноидальных оболочек [34] и непологих оболочек, проводимые в последнее время в Индии и ряде других стран, показывают, что они востребованы и практикой, и наукой. Подавляющее число научных исследований и статей, опубликованных в 2000-2017 годах, посвящено изучению собственных колебаний коноидальных оболочек и динамическим задачам.

Желающие получить дополнительную информацию о шедовых покрытиях промышленных зданий, спортзала, построенных до 1960 года в разных странах могут воспользоваться материалами книги [35].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. Encyclopedia of Analytical Surfaces. – Springer International Publishing Switzerland, 2015. – 752 p.
2. Bradshaw R., Campbell D., Gargari M., Mirmiran A., and Tripeny P. Special structures. Past, present, and future// *Journal of Structural Engineering*. – June 2002. – P. 691-701.
3. Ch.A. Bock Hyeng, Krivoshapko S. N. Umbrella-Type Surfaces in Architecture of Spatial Structures// *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. – 2013. –Vol. 3, Iss. 3. – PP. 43-53.
4. Кривошапко С.Н. К вопросу о применении параболических оболочек вращения в строительстве в 2000-2017 годах// *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2017. – № 4. – С. 4-14.
5. Krivoshapko S.N. Static, vibration, and buckling analyses and applications to one-sheet hyperboloidal shells of revolution// *Applied Mechanics Reviews (USA)*. –Vol.55. – No 3. – May 2002. – С.241-270.
6. Гринько Е.А. Обзорные работы по геометрии, прочности, устойчивости, динамике и применению оболочек со срединными поверхностями различных классов// *Монтажные и специальные работы в строительстве*. – 2012. –№ 2. –С. 15-21.
7. Кривошапко С.Н. Коноидальные оболочки // *Монтажные и специальные работы в строительстве*. – 1998. – № 6. – С. 22-24.
8. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Аналитические поверхности в архитектуре зданий, конструкций и изделий: Монография. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 328 с.
9. Ljubica S. Velimirović, Mića S. Stanković, Grozdana Radivojević. Modeling conoid surfaces// *Facta Universitatis: Architecture and Civil Engineering*. – 2002. – Vol. 2, No 4. – P. 261-266.
10. Krivoshapko S.N. Geometry and strength of general helicoidal shells// *Applied Mechanics Reviews (USA)*. – Vol.52. – No 5. – May 1999. – P. 161-175.
11. Doležal J. The story of a right wavelet conoid// *WDS' 11 Proceedings of Contributed Papers, Part 1*. – 2011. – P. 72-77.
12. Drăgan Delia; Bărbîntă Dorin; Pondichi-Alb Claudia. Study on the representation in projection with elevations of conoid type surfaces// *Advanced Engineering Forum*. – 2017. – Vol. 21. – Pp. 118-425.
13. Davis R.F. On the cylindroid// *The Mathematical Gazette*. – Jul., 1990. – Vol. 1. – No 22. – P. 370-371.
14. Хаустова Н.Д. О свертывании разверток, построенных по способу триангуляции, в многогранные поверхности, аппроксимирующие цилиндриды// *Доклады VIII научно-техн. конф. инж. ф-та*. – М.: УДН им. П. Лумумбы, 1972. – С. 11-13.
15. Chudley Roy and Greeno, Roger. *Advanced Construction Technology: Fourth edition*. – Prentice Hall, 2006. – 633 p.
16. Меньшиков Н.Г. К вопросу изыскания оптимальных форм большепролетных железобетонных конструкций покрытий// *Труды МИСИ*. – М.: изд. МИСИ, 1954. – С. 105- 114.
17. Eladio Dieste. Church at Atlantidal Uruguay// *Architectural Review*. – 1961. - September. – Pp. 173-175.
18. Paczkowski W., Drozdowicz R., Mielczarek M. Badania modelowe powloki walcowej w tunelu aerodynamicznym// *Inzynieria i Budownictwo*. – Nr 5/96. – Pp.307-309
19. Krasic Sonja. Geometrijske Površi u Arhitekturi. – Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu, 2012. – 238 p.
20. Law Marilyn. Mimic a Master Builder: A Tribute to Felix Candela// *Autodesk User Group International (AUGI)*. – 2012. – July 18 (Электронный ресурс)
21. Perez A., McCarthy J.M. Bennett's linkage and the cylindroid// *Mechanism and Machine Theory*. – April 2002. – P.1-19.
22. Brandner G. Rauemliche Verzahnungen// *Maschinenbautechnik*. – Berlin, 1983, № 8. – S.369-372.
23. Nayak A.N. and Bandyopadhyay J.N. Dynamic response analysis of stiffened conoidal shells// *Journal of Sound and Vibration*. – 291(3-5). – Pp. 1288-1297.
24. Kumari S. and Chakravorty D. Study of static characteristics of delaminated composite conoidal shell subjected to point load// *Journal of advanced materials research*. – 2010. – 123–125. – Pp. 455–458.
25. Das S.H. and Chakravorty D. Bending analysis of stiffened composite conoidal shell roofs through finite element application // *Journal of composite materials*. – 2011. – 45(5). – Pp 525-542.
26. Kumari S. and Chakravorty D. Bending of delaminated composite conoidal shells under uniformly distributed load// *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*. – 2011. – 137(10). – Pp. 660-668.
27. Pradhan Nibedita and Jena Joygopal. Static characteristics of stiffened conoidal shell roofs under concentrated load// *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. – 2012. – 4(2). – Pp. 195-205.
28. Kumari S. and Chakravorty D. On the bending characteristics of damaged composite conoidal shells - a finite element approach// *Journal of Reinforced Plastics and Composite*. – 2010. – 29(21). – Pp. 3287– 3296.
29. Nayak A.N. and Bandyopadhyay J.N. Free vibration and design aids of stiffened conoidal shells// *Journal of Engineering Mechanics*. – 2002. – 128 (4). – P. 419-427.
30. Nayak A.N. and Bandyopadhyay J.N. Free vibration analysis of laminated stiffened shells// *Journal of Engineering Mechanics*. – 2005. – 131(1). – P. 100-105.

31. Hota S.S. and Chakravorty D. Free vibration of stiffened conoidal shell roofs with cutouts// Journal of Vibration and Control. – 2007. – 13(3). – Pp. 221-240.
32. Gorjanc Sonja. Some examples of using Mathematica in teaching geometry// Proc. of the 10th International Conference on Geometry and Graphics. – Vol. 2. – July 28 – August 2, 2002, Kyiv, Ukraine. – Pp. 89-93.
33. Tocariu Liliana. Stages in the study of cylindroid surfaces// The SORGING Journal. – 2007. – Vol. 2. – Iss. 1. – Pp. 37-40.
34. Stavridis L.T. Dynamic analysis of shallow shells on rectangular base// J. Sound and Vibr. – 1998. – 218(5). – Pp. 861-882.
35. Рюле Г. Пространственные покрытия. – М.: Стройиздат, 1973. – Том 1. – 304 с.

Кривошапко Сергей Николаевич

Российский университет дружбы народов, Москва

д.т.н., профессор, профессор Департамента Архитектуры и Строительства, Инженерная Академия

E-mail: sn.krivoshapko@mail.ru

S.N. KRIVOSHAPKO

THE APPLICATION OF CONOID AND CYLINDROID IN FORMING OF BUILDINGS AND STRUCTURES OF SHELL TYPE

Among tens of known ruled surfaces, which can be taken as middle surfaces of the shells, ruled surfaces of zero Gaussian curvature such as conic, cylindrical, and torse surfaces and also ruled surfaces of negative Gaussian curvature such as one-sheet hyperboloids, hypars, conoids find wide application. Circle and parabolic cylindrical and conic surfaces, hypars and one-sheet hyperboloid of revolution have the widest spread in modern design and building due to well-studied geometry of their form, existence of the methods of strength, buckling, and dynamic analyses, and due to their claiming for practical needs. But theoretical investigations of conoid shells, researches of their opportunities were not stopped. Some new information on strength analysis of right conoid shells, on the determination of their natural frequencies, examples of application of conoid shells for the shed roofs of industrial building, for the roofs of private villas and public buildings, summer theaters and museums, the application of them in modern sculptural complexes are presented in this review. It is shown that designing and building of conoidal shells is continued in 2000-2017 but on the lesser scales.

All main presented references are dated the XXIst century.

Key words: ruled surface, conoid, cylindroid, conoidal shell, static strength analysis, natural frequencies.

REFERENCES

1. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. Encyclopedia of Analytical Surfaces. Springer International Publishing Switzerland, 2015, 752 p.
2. Bradshaw, R., Campbell, D., Gargari, M., Mirmiran, A., and Tripeny, P. Special structures. Past, present, and future. Journal of Structural Engineering, June 2002, 691-701.
3. Ch.A. Bock Hyeng, Krivoshapko S. N. Umbrella-Type Surfaces in Architecture of Spatial Structures. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), 2013, Vol. 3, Iss. 3, 43-53.
4. Krivoshapko S.N. On application of parabolic shells of revolution in building in 2000-2017. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings, 2017, (4), 4-14 (in Russian).
5. Krivoshapko S.N. Static, vibration, and buckling analyses and applications to one-sheet hyperboloidal shells of revolution. Applied Mechanics Reviews (USA), 55(3), May 2002, 241-270.
6. Grin'ko E.A. Review work on geometry, strength, stability, dynamic, and application of shells with the middle surfaces of different classes. Montazh. i Spetz. Raboty v Stroitel'stve, 2012, (2), 15-21 (in Russian).
7. Krivoshapko S.N. Conoidal shells. Montazh. i Spetz. Raboty v Stroitel'stve, 1998, (6), 22-24 (in Russian).
8. Krivoshapko S.N., Mamieva I.A. Analytical Surfaces in Architecture of Buildings, Structures, and Details: Monograph. Moscow: Kn. Dom "LIBROKOM", 2012, 328 p. (in Russian).
9. Ljubica S. Velimirović, Mića S. Stanković, Grozdana Radivojević. Modeling conoid surfaces. Facta Universitatis: Architecture and Civil Engineering, 2002, 2(4), 261-266.
10. Krivoshapko S.N. Geometry and strength of general helicoidal shells. Applied Mechanics Reviews (USA), May 1999, 52(5), 161-175.
11. Doležal J. The story of a right wavelet conoid. WDS' 11 Proceedings of Contributed Papers, Part 1, 2011, 72-77.

12. Drăgan Delia; Bărbîntă Dorin; Pondichi-Alb Claudia. Study on the representation in projection with elevations of conoid type surfaces. *Advanced Engineering Forum*, 2017, Vol. 21, 118-425.
13. Davis R.F. On the cylindroid. *The Mathematical Gazette*, Jul., 1990, 1(22), 370-371.
14. Haustova N.D. On rolling of developments, made by a method of triangulation, into the polyhedral surfaces approximating cylindroids. *Doklady VIII Nauchno-Tehn. Konf. Inzh. f-ta*, Moscow: UDN im. P. Lumumby, 1972, 11-13 (in Russian).
15. Chudley Roy and Greeno, Roger. *Advanced Construction Technology: Fourth edition*. Prentice Hall, 2006, 633 p.
16. Men'shikov N.G. On optimal forms of large-span reinforced concrete structures. *Trudy MISI*, Moscow: izd. MISI, 1954, 105-114 (in Russian).
17. Eladio Dieste. Church at Atlantidal Uruguay. *Architectural Review*, 1961, September, 173-175.
18. Paczkowski W., Drozdowicz R., Mielczarek M. Badania modelowe powloki walcowej w tunelu aerodynamicznym. *Inzynieria i Budownictwo*, Nr 5/96, 307-309
19. Krasic Sonja. Geometrijske Površni u Arhitekturi. *Gradevinsko-arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu*, 2012, 238 p.
20. Law Marilyn. Mimic a Master Builder: A Tribute to Felix Candela. *Autodesk User Group International (AUGI)*, 2012, July 18 (Electr. resurce).
21. Perez A., McCarthy J.M. Bennett's linkage and the cylindroid. *Mechanism and Machine Theory*, April 2002, 1-19.
22. Brandner G. Rauemliche Verzahnungen. *Maschinenbautechnik*, Berlin, 1983, № 8, 369-372.
23. Nayak A.N. and Bandyopadhyay J.N. Dynamic response analysis of stiffened conoidal shells. *Journal of Sound and Vibration*, 291(3-5), 1288-1297.
24. Kumari S. and Chakravorty D. Study of static characteristics of delaminated composite conoidal shell subjected to point load. *Journal of Advanced Materials Research*, 2010, (123-125), 455-458.
25. Das S.H. and Chakravorty D. Bending analysis of stiffened composite conoidal shell roofs through finite element application. *Journal of Composite Materials*, 2011, 45(5), 525-542.
26. Kumari S. and Chakravorty D. Bending of delaminated composite conoidal shells under uniformly distributed load. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 2011, 137(10), 660-668.
27. Pradhan Nibedita and Jena Joygopal. Static characteristics of stiffened conoidal shell roofs under concentrated load. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2012, 4(2), 195-205.
28. Kumari S. and Chakravorty D. On the bending characteristics of damaged composite conoidal shells - a finite element approach. *Journal of Reinforced Plastics and Composite*, 2010, 29(21), 3287- 3296.
29. Nayak A.N. and Bandyopadhyay J.N. Free vibration and design aids of stiffened conoidal shells. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128 (4), 419-427.
30. Nayak A.N. and Bandyopadhyay J.N. Free vibration analysis of laminated stiffened shells. *Journal of Engineering Mechanics*, 2005, 131(1), 100-105.
31. Hota S.S. and Chakravorty D. Free vibration of stiffened conoidal shell roofs with cutouts. *Journal of Vibration and Control*, 2007, 13(3), 221-240.
32. Gorjanc Sonja. Some examples of using Mathematica in teaching geometry. *Proc. of the 10th International Conference on Geometry and Graphics*, Vol. 2, July 28 – August 2, 2002, Kyiv, Ukraine, 89-93.
33. Tocariu Liliana. Stages in the study of cylindroid surfaces. *The SORGING Journal*, 2007, 2(1), 37-40.
34. Stavridis L.T. Dynamic analysis of shallow shells on rectangular base. *J. Sound and Vibration*, 1998, 218(5), 861-882.
35. Rühle H., Kühn E., Weißbach K., Zeidler D. *Räumliche Dachtragwerke. Konstruktion und Ausführung*. Band 1, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1969, 300 p.

S. N. Krivoshapko

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

Doctor of Technical Science, Prof., Prof. of the Architecture and Building Department, Engineering Academy

E-mail: sn.krivoshapko@mail.ru