

С.Н. КРИВОШАПКО¹¹ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов (РУДН)», г. Москва, Россия

ОБОЛОЧКИ И СТЕРЖНЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ФОРМЕ АНАЛИТИЧЕСКИ НЕЗАДАВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ

Аннотация. В XXI веке практически во всех странах появляются сооружения в форме аналитически задаваемых поверхностей. Возникла архитектура произвольных форм. Архитекторы использовали весь свой арсенал аналитических поверхностей, пригодный для воплощения их творческих концепций. Как показали исследования, проведенные в РУДН, в настоящее время нашли применение только 43 аналитические поверхности из 600 известных. Но многие известные и молодые архитекторы и конструкторы перешли к применению поверхностей, которые нельзя задать аналитически. Их замыслы воплотились во многих гражданских, общественных и промышленных сооружениях и стали архитектурными достопримечательностями городов и стран, наряду с сооружениями, построенными раньше в форме канонических поверхностей. В статье приводятся примеры наиболее интересных зданий, дается классификация оболочек и пространственных структур свободных форм в зависимости от их расчетных схем, материала и конструктивных решений. Цель настоящего исследования – выяснить степень вовлеченности архитекторов, геометров и инженеров-расчетчиков в разработку и строительство оболочек и стержневых структур в форме аналитически задаваемых поверхностей.

Ключевые слова: архитектура произвольных форм, оболочка свободной формы, стержневые пространственные структуры, аналитически неопределимые поверхности, 3D печатный дом произвольной формы.

S.N. KRIVOSHAPKO¹¹Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

SHELLS AND ROD STRUCTURES IN THE FORM OF ANALYTICALLY NON-GIVEN SURFACES IN MODERN ARCHITECTURE

Abstract. In the XXIth century practically in all countries, erections in the form of analytically non-given surfaces are appeared. Architecture of arbitrary shapes was springing up. Architects used their entire arsenal of analytical surfaces suitable for realization of their creative ideas. The investigations carried out in RUDN showed that only 43 analytical surfaces from 600 known surfaces found the application in the World at present time. But many noted and young architects and designers began to use surfaces that are impossible to give by analytical formulas. Their intentions were realized into many civil, public, and industrial erections and they came to be as the architectural sights of the towns and countries equally with the erections built before in the form of canonical surfaces. In a paper, the examples of the most interesting buildings are presented; the classification of shells and shell spatial structures of free forms is given according to their analysis schemes, material, and structural solutions. The aim of presented research is to elucidate an extent of involving of architects, geometricians, and designers into working up and building of shells and rod structures in the form of analytically non-given surfaces.

Keywords: free form architecture, a shell of arbitrary form, rod spatial structure, analytically non-given surface, a 3D print building of arbitrary form.

1. Введение

Несмотря на то, что в научно-технической литературе описаны множество примеров применения тонких оболочек в форме канонических поверхностей, таких как параболоид вращения [1], однополостный гиперболоид вращения [2], коноид [1, 3], эллипсоид вращения [1], эллиптический параболоид [4], конические поверхности [5] и др., архитекторы всё боль-

ше применяют тонкостенные и стальные однослойные сетчатые оболочки в форме аналитически задаваемых поверхностей. Этому способствует широкое распространение численных методов задания поверхностей и развитие численных методов расчета оболочек с помощью МКЭ. В этих случаях требуется задание срединных поверхностей оболочек с помощью реперных точек в отличие от аналитического задания поверхностей [6].

А.Л. Гольденвейзер [7] и С.Н. Кривошапко [8] предложили для применения системы расчетных уравнений, включающие в себя уравнения равновесия, физические и геометрические уравнения в неортогональных криволинейных координатах, которые можно использовать, если срединная поверхность оболочки задана не в линиях кривизн. Эти системы для оболочек в линиях кривизн становятся тождественными. Однако расчетные уравнения для оболочек с аналитическими срединными поверхностями, заданными в неортогональных криволинейных координатах, были применены только для расчета прямых [9] и развертывающихся [10] геликоидов.

Круг оболочек, заданных в линиях кривизн, для которых получены аналитические решения для определения параметров напряженно-деформированного состояния, намного шире.

2. Цель исследования

В области расчета, проектирования и возведения оболочек простой канонической формы накоплен большой опыт, но эти оболочки уже не могут удовлетворить всех потребностей общества. Строительство зданий и сооружений с большими пролетами или сложной геометрической формы – показатель высокого уровня достижений строительной науки [11]. Цель настоящего исследования – выяснить степень вовлеченности архитекторов, геометров и инженеров-расчетчиков в разработку и строительство оболочек и стержневых структур в форме аналитически задаваемых поверхностей.

3. Примеры оболочек и стержневых структур в современной архитектуре произвольной формы

3.1. Пространственные стержневые структуры в форме аналитически задаваемых поверхностей и заполнением треугольными и четырехугольными панелями

Эти конструкции, хотя и очень похожи на оболочки, с точки зрения строительной механики ими не являются. Если пространство между стержнями заполняется плоскими или изогнутыми панелями, не воспринимающими внешнюю нагрузку, действующую вне области самих панелей, то эту конструкцию необходимо рассчитывать, как пространственную стержневую структуру (рисунок 1).

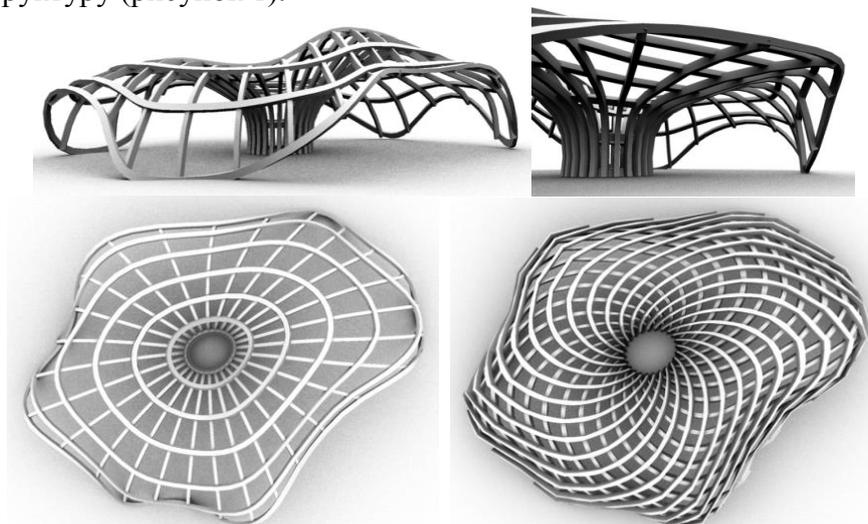


Рисунок 1 – Эскизы металлических стержневых структур



Рисунок 2 - Покрытие из стали и стекла над двумя зданиями гостиницы, Абу-Даби (ОАЭ)

Общее покрытие из стали и стекла двух отдельно стоящих зданий гостиницы YasMarina в Абу-Даби, ОАЭ (рисунок 2) наглядно подтверждает преимущество стальных конструкций перед железобетонными при определенных архитектурных решениях пространственных композиций. Здесь покрытие опирается на 10 V-образных колонн, а горизонтальные воздействия воспринимаются подкосами, установленными на уровне перекрытий гостиных. Покрытие содержит более 5000 соединений. Гладкая поверхность оболочки аппроксимирована плоскими прямоугольными элементами, что облегчило остекление оболочки, причем эти элементы крепятся к неплоской решетке оболочки, чем обеспечивается устойчивость к динамическому воздействию ветра. V-образные колонны диаметром от 508 до 914 мм и толщиной 30 или 40 мм и контурная балка диаметром 559 мм и толщиной от 14 до 70 мм имеют трубчатое поперечное сечение, а элементы решетки выполнены из горячекатаного прямоугольного полового стального проката 100×250 мм с толщиной стенки от 7 до 40 мм [12].



Рисунок 3 - Торговый центр «Золотые террасы», Варшава, Польша

Покрытие торгового центра в Варшаве аппроксимировано треугольными элементами. Архитектурные решения разрабатывались компанией Jerde Partnership International (рисунок 3). Треугольные панели более точно аппроксимируют гладкую поверхность покрытия. Здание возведено в 1998 году.

«Стеклянная кора» — крупнейшая в мире светопрозрачная конструкция, созданная российскими проектировщиками и строителями по концепции британских инженеров из компании «Vigo Harrold» (рисунок 4а). Покрытие «Стеклянной коры» представляет собой однослойную сетчатую оболочку свободной формы, состоящую из более 1300 узловых элементов, более 8000 балок, 106 опор-колонн и более 2400 стеклопакетов с индивидуальными

размерами. Площадь покрытия из металлического каркаса и стеклянных треугольников (рисунки 4б) – 8700 м².

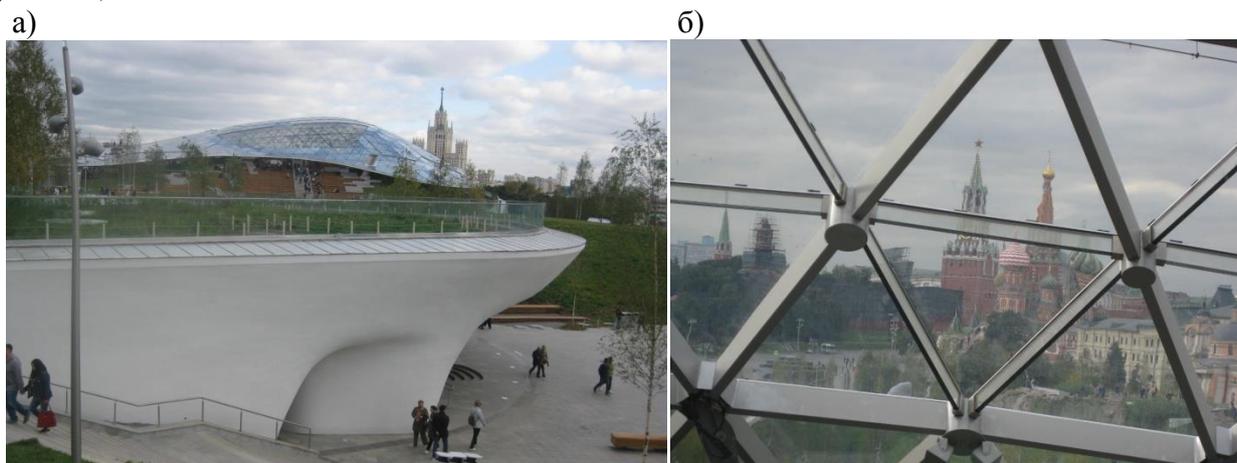


Рисунок 4 - «Стеклянная кора», г. Москва: а) общий вид; б) фрагмент оболочки покрытия

Авторы расчетной модели стальной однослойной сетчатой оболочки: Ю. Лунев, А. Морозов, ООО «Несущие системы», г. Новосибирск. Конечно-элементная модель сетчатой оболочки включает в себя несущие металлические элементы каркаса с учетом наклонных сварных колонн переменного сечения. В расчётной модели учтены стеклянные балки «Окна». Стеклянные панели покрытия стальных конструкций сетчатой оболочки смоделированы оболочечными конечными элементами. Здание концертного зала «Стеклянная кора» встроено в состав парка «Зарядье», Москва [<https://www.liraland.ru/lira/projects/3366/>].

3.2. Железобетонные оболочки в современной архитектуре произвольной формы

Ярким представителем этого вида оболочек является здание Музея современного искусства в Каглиари, Италия (Nuragicand Contemporary Art Museum, Cagliari, Italy), проект которого был разработан архитектурным бюро Zaha Hadid Architects под руководством знаменитого архитектора ЗахаХадид (рисунок 5).



Рисунок 5 - Музей современного искусства в Каглиари, Италия

Новый урбанистический культурный центр в Мускате (New Cultural Center in Muscat), Оман, включает в себя Национальный архив, Национальную библиотеку и Оманский национальный театр (рисунок 6).

Комплекс был запроектирован архитектурным бюро Architecture-Studio Architects, Paris. Хотя в технической литературе покрытие центра называют «арабским зонтиком» («musharabiehсарону»), по-видимому, форма покрытия очень близка к велароидальной поверхности.

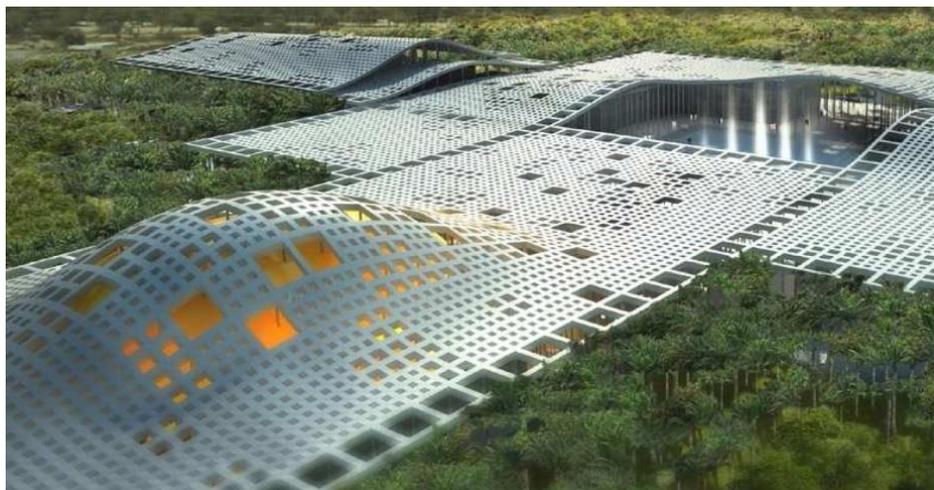


Рисунок 6 - Новый культурный центр в Мускате, Оман

Компания WATG Urban Architecture (Чикаго, США) запроектировала первый в мире 3D-печатный дом произвольной формы (рисунок 7).

Проект получил первый приз на конкурсе FreeformHomeDesignChallenge и будет построен в г. Чаттануге (штат Теннесси).

В качестве примера железобетонной оболочки свободной формы можно привести также одно из сооружений «Города искусства и науки», Испания, г. Валенсия.

С. Калатрава запроектировал свое сооружение из фрагментов сферических поверхностей (рисунок 8).



Рисунок 7 - Первый в мире 3D-печатный дом произвольной формы



Рисунок 8 - Дворец искусств королевы Софии, г. Валенсия, Испания

Небольшая часть приведённых в этом разделе примеров зданий свободной формы из железобетона показывает, что этот материал активно применяется для осуществления творческих замыслов архитекторов, работающих с тонкостенными оболочками, срединные поверхности которых невозможно задать аналитическими формулами.

3.3. Оболочки свободной формы с несущими конструкциями, формирующими треугольную или четырехугольную структуру и сплошным покрытием (настилом)

Ярким примером удачного использования природного ландшафта для производственных зданий является ликеро-водочный завод Macallan, построенный в Шотландии, Англия, в 2018 году.

Проект разработан компанией RogerStirkHarbour&Partners. Весь комплекс находится под деревянной крышей, покрытой дерном (рисунок 9а). Несущие деревянные балки из кле-

енного бруса формируют сетку 3×3 м, а сверху укладывается деревянный настил (рисунок 9б). Сооружение уже представлено для участия в Международном архитектурном конкурсе.

а)



б)



*Рисунок 9 - Ликеро-водочный завод Macallan, Шотландия, Англия:
а) общий вид, б) вид изнутри на конструкцию покрытия*

Несущий стальной каркас Московского молодежного центра «Планета КВН» обертывается двумя полотнищами из перфорированного алюминиевого листа, уложенных на направляющие, которые расположены с одинаковым шагом 1,5 м (рисунок 10). Реконструкция кинотеатра, на основе которого архитектурной компанией «Атриум» запроектирован Молодежный центр, отмечена первым местом на открытом архитектурном конкурсе Архновация 2013. Центр стал архитектурной доминантой района.

Проект павильона Люксембурга на выставке ЭКСПО-2020, представленный студией МЕТАФОРМ («METAFORMarchitecturestudio»), будет реализован в Дубае, ОАЭ. Габариты павильона: ширина – 50 м, длина – 38 м, высота – 21 м. Форма павильона будет похожа на ленту Мёбиуса (рисунок 11).

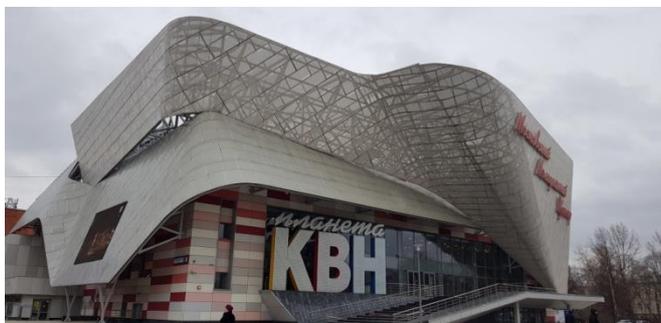


Рисунок 10 - Московский молодежный центр



Рисунок 11 - Проект павильона Люксембурга на ЭКСПО -2020 [www.luxembourgexpo2020dubai.iu]

Стальная конструкция будет формировать четырехугольную структуру, которая затем будет покрываться огнестойким стекловолокном. По-видимому, поверхность сооружения будет аппроксимироваться системой конусов, чтобы не было разрывов и складок стекловолокна. Стальная структура и полотно после выставки будет демонтирована и использоваться в другом месте

3.4. Здания с фасадами, образованными параболическим изгибанием листового материала

Параболическим изгибанием листового материала можно получить любую торсовую поверхность. Параболическое изгибание – изгибание, производимое без разрывов и складок

исходного плоского листа. Используя это свойство, архитекторы получают интересные наружные фасады сооружений в архитектурном стиле деконструктивизма и экспрессионизма. В первую очередь внешний вид здания должен привлекать внимание прохожих, что наиболее удачно было достигнуто в двух сооружениях: концертный зал Уолта Диснея в Лос-Анжелесе (Walt Disney Concert Hall), США (рисунок 12), и музей современного искусства в Херфорде (MARTa Museum), Германия (рисунок 13).



Рисунок 12 - Концертный зал Уолта Диснея в Лос-Анжелесе, США



Рисунок 13 - Музей современного искусства в Херфорде, Германия

Оба сооружения были запроектированы архитектором Фрэнком Гери (Frank Gehry). Мнения об архитектуре Ф. Гери традиционно противоречивы, но любой хоть раз увидевший его сооружения не забудет их никогда. Концертный зал Уолта Диснея в Лос-Анжелесе (США) открыт в 2003 году, а музей современного искусства в Херфорде (Германия) – в 2005 году. Причем музей современного искусства в Херфорде был признан лучшим музеем Германии в 2014 году. Геометрическое моделирование покрытия было выполнено Дж. Маерттерером (JessMaertterer).

Здания с фасадами или с покрытиями, образованными параболическим изгибанием листового материала в настоящее время встречаются редко, так как немногие архитекторы и конструкторы берутся за их реализацию, хотя можно с уверенностью сказать, что эти формы могут быть только торсовыми поверхностями.

4. Примеры из бионической архитектуры

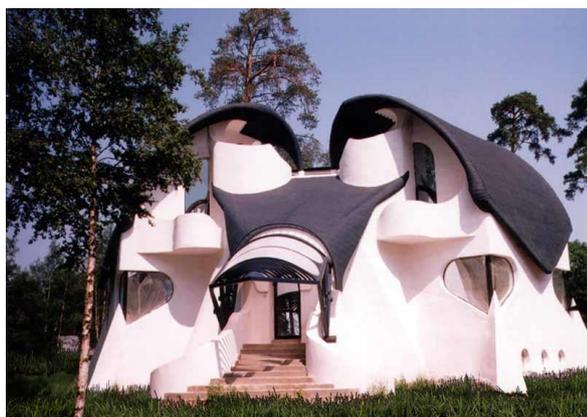


Рисунок 14 - Коттедж «Глаза», г. Сестрорецк

Бионическая архитектура разрабатывает сооружения, которые вписываются в природную среду, образуя продолжение её естественного развития. Архитектурная бионика пытается избежать в строительстве домов однообразных прямых линий с гладкими стенами и старается превратить их в некий пейзаж с отсутствием угловых секций.

Одним из примеров бионической архитектуры в России можно назвать коттедж «Глаза», построенный в городе Сестрорецке архитектором Б. Левинзоном (рисунок 14).

Считается, что необычные формы, отсутствие прямых линий, стены и крыша в виде произвольных поверхностей визуально дополняют местность, на которой выстроен дом.

Хорошо известен проект плавучего города «Кувшинка», предложенный архитектурным бюро Винсента Каллебо (Vincent Callebaut), жилой коттедж «Дом-улитка», построенный по проекту Х. Сеносиана в г. Мехико.

Множество сооружений, построенных в стиле бионической архитектуры, формируется аналитически задаваемыми поверхностями.

5. Предложенные классификации оболочек и пространственных структур свободных форм

Для оболочек свободной формы из стальных конструкций предложена следующая классификация [13]: 1) оболочка, аппроксимированная треугольными панелями, 2) оболочка, аппроксимированная четырехугольными панелями, 3) несущие конструкции формируют треугольную или четырехугольную структуру, 4) оболочки из изогнутых панелей.

Три точки в пространстве лежат в одной плоскости, поэтому треугольные панели проще применить вместо четырехугольных. Но зато у последних – меньше элементов на узел, меньше элементов на единицу площади поверхности, более легкая конструкция. Изогнутые панели используются, несмотря на то, что они дороже других вариантов, но часто это связано с художественными причинами и качеством конечной поверхности, т.к. не будут видны разрывы и перегибы поверхности. Если запроектировать оболочку свободной формы в виде торсовой поверхности, то эту оболочку можно получить параболическим изгибанием плоского листа. Другие поверхности получаются методом горячего изгиба с использованием пресс-форм. Изогнутые панели можно использовать как опалубку для тонкостенных железобетонных оболочек.

Предложенное выше в разделах 3 и 4 разделение оболочек и пространственных структур тоже можно считать, как их классификация.

6. Обзор научных работ по геометрии и расчету оболочек в форме аналитически задаваемых поверхностей

В работе [13] отмечается, что взаимодействие геометрии с архитектурой произвольной формы дало ускоренное развитие некоторым разделам дискретной дифференциальной геометрии. Однако уникальные решения некоторых математических задач на практике могут быть неприемлемы.

Существует много компьютерных программ, которые помогают в создании неканонических форм сооружений путем деформации известных поверхностей. Геометры предложили несколько видов поверхностей, которые можно принять за поверхности, задаваемые аналитическими уравнениями: поверхности Кунса, поверхности с образующими в плоскостях пучка в сферической системе координат, эвольвентные линейчатые поверхности, линейчатые поверхности с опорными точками на прямой линии и др. Много таких поверхностей описано в работе [14].

Обзор современного состояния теории оболочек сложной геометрии и оболочек в форме аналитически неопределимых поверхностей представлен в статье [15] с. 42 наименованиями использованной литературы. Здесь отмечается, что вначале оболочки, спроектированные на основе аналитического расчета и применяемые в реальных конструкциях, относились, с геометрической точки зрения, к ограниченному числу поверхностей. Затем с развитием численных методов расчета и усовершенствования ЭВМ стало возможным получение уточненных решений сложных задач теории оболочек. В статье [15] рассмотрены геометрические и прочностные исследования тонких гладких оболочек сложной формы, но составные и складчатые оболочки не рассматривались.

Методы расчета, разработанные для оболочек с аналитически определенными поверхностями, не могут быть применены непосредственно для оболочек в форме аналитически задаваемых поверхностей. Только численные методы могут привести к решению задачи.

6. Выводы

Э.З. Жуковский с коллегами [16] отмечал четкую тенденцию в мировой практике, заключающуюся в применении пространственных конструкций свободной формы, которые дают выразительные образы, принятые в современном обществе и решающие функциональные задачи. Приведенные в разделе 3 примеры подтверждают этот вывод.

П.Г. Еремеев [17] указывал, что «Проектирование должно быть четко организовано с учетом строгого контроля и приемки, минимизации человеческих ошибок. Расчетная схема должна быть максимально приближена к натурной конструкции. Расчет следует выполнять с учетом физической и геометрической нелинейности как единой пространственной системы, включающей фундаменты, каркас, большепролетное покрытие. Для повышения надежности результатов расчеты рекомендуется проводить с использованием современной вычислительной техники с применением различных программ. Следует иметь в виду, что использование компьютера имеет и обратную сторону – растет риск ошибок. Необходимо ясно понимать работу сооружения, основываясь на правилах строительной механики».

Изучение построенных оболочек и стержневых структур в форме аналитически задаваемых поверхностей в современной архитектуре показывает, что некоторые известные архитекторы и архитектурные компании довольно активно участвуют в проектировании этих сооружений. Практически все указанные в статье здания и сооружения получили Международные архитектурные премии и стали архитектурными доминантами городов, где они построены. Молодые талантливые архитекторы и студенты архитектурных специальностей вузов [18] часто выбирают в качестве тем своих разработок и дипломных проектов комплексы в форме аналитически задаваемых поверхностей. По-видимому, формообразование большепролетных тонкостенных оболочек, очерченных по каноническим поверхностям, себя исчерпало, любое новое сооружение будет повторением уже построенных аналогов. Проявить свои творческие концепции можно, в основном, используя арсенал новых оболочек и стержневых структур в форме аналитически задаваемых поверхностей. Хотя ряд известных архитекторов не согласен с этим выводом. Например, Р.Б. Фуллер так отзывался о своих архитектурных творениях: «Пусть архитекторы заливают об эстетику, заставляющей толпы богачей падать к их ногам. Я предпочту Купол, где стрессы и напряжения уходят прочь» [19].

Исследования, проведенные в Российском университете дружбы народов, показали, что из 600 предложенных геометрами поверхностей в строительстве использовались только 43 аналитические поверхности [20], причем в Москве только 18 поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. KrasicSonja. GeometrijskePovršiuArhitekturi. – Gradevinsko-arhitektonskifakultetUniverzitetuNišu, 2012. 238 p.
2. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Стержневые системы в форме однополостного гиперboloида вращения // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2011. № 11. С. 19-23.
3. Das S.H., Chakravorty D. Bending analysis of stiffened composite conoidal shell roofs through finite element application // Journal of composite materials. 2011. 45(5). Pp 525-542.
4. Krivoshapko S.N., G.L. GbaguidiAïssè. Geometry, static, vibration and buckling analysis and applications to thin elliptic paraboloid shells// The Open Construction and Building Technology Journal. 2016. 10(1). P. 576-602 [DOI: 10.2174/1874836801610010576].
5. Мамиева И.А., Разин А.Д. Знаковые пространственные сооружения в форме конических поверхностей // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 10. С. 5-11.
6. Романова В.А. Особенности изображения процесса образования поверхностей в системе САПР AutoCAD // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2012. № 4. С.3-5.
7. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. – Москва: ГТТИ, 1953. 544 с.
8. Кривошапко С.Н. Два вида расчетных уравнений для оболочек в произвольных криволинейных координатах // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 1. С. 15-22.

9. Rynkovskaya M., Ivanov V. Analytical method to analyze right helicoid stress-strain// *Advanced Structured Materials*. 2019. Vol 92. Pp. 157-171.
10. Krivoshapko S.N. Static analysis of shells with developable middle surfaces// *Applied Mechanics Reviews*. Vol.51. No12, Part 1. December 1998. Pp. 731-746.
11. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Выдающиеся пространственные сооружения последних 20 лет // *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2012. № 12. С. 8-14.
12. Schober Hans, Justiz Stefan, Tamai Hiroki. Speed and grace// *Civil Engineering*. 2011. February. Pp. 54-59
13. Логунова М.В., Хадидан Мохамед Сейф-еддин, Буссаха Фетхи. Геометрические формы оболочек в архитектурном конструировании// *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. № 08(62). Часть 1. С. 140-143.
14. Иванов В.Н., Романова В.А. Конструкционные формы пространственных конструкций. Визуализация поверхностей в системах MathCad, AutoCad. М.: Изд-во АСВ, 2016. 412 с.
15. Кривошапко С.Н. Обзор современного состояния теории оболочек сложной геометрии и оболочек в форме аналитически неопределимых поверхностей // *Монтажные и спец. работы в строительстве*. 1998. №5. С. 24-28.
16. Жуковский Э.З., Шилобреев Ю.А., Шевченко О.В. Большепролетные пространственные конструкции в мировой практике // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1990. № 5. С. 87-91.
17. Еремеев П.Г. Металлические конструкции покрытий уникальных большепролетных сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. № 3.
18. Мамиева И.А. О подготовке специалистов по архитектуре, геометрии и расчету большепролетных пространственных структур и оболочек // *Строительство и реконструкция*. 2016. № 5 (67). С. 114-118.
19. Кривошапко С.Н. О возможностях оболочечных сооружений в современной архитектуре и строительстве// *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2013. № 1. С. 51-56.
20. Мамиева И.А. Аналитические поверхности для параметрической архитектуры в современных зданиях и сооружениях // *Academia. Архитектура и строительство*. 2020. № 1.

REFERENCES

1. Krasic Sonja. Geometrijske Površine Arhitekturi. Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta Niša, 2012. 238 p.
2. Krivoshapko S.N., Mamiyeva I.A. Sterzhnevyye sistemy v forme odnopolostnogo giperboloida vrashcheniya [Rod systems in the form of a one-sheet rotational hyperboloid]. *Montazhnyye i spetsial'nyye raboty v stroitel'stve*. 2011. No 11. P. 19-23.
3. Das S.H., Chakravorty D. Bending analysis of stiffened composite conoidal shell roofs through finite element application. *Journal of composite materials*. 2011. 45(5). Pp 525-542.
4. Krivoshapko S.N., G.L. Gbaguidi Aïssè. Geometry, static, vibration and buckling analysis and applications to thin elliptic paraboloid shells. *The Open Construction and Building Technology Journal*. 2016. 10(1). P. 576-602. DOI: 10.2174/1874836801610010576.
5. Mamiyeva I.A., Razin A.D. Znakovyye prostranstvennyye sooruzheniya v forme konicheskikh poverkhnostey [Sign spatial structures in the form of conical surfaces]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2017. No 10. P. 5-11.
6. Romanova V.A. Osobennosti izobrazheniya protsessa obrazovaniya poverkhnostey v sisteme SAPR AutoCAD [Features of the image of the surface formation process in the AutoCAD CAD system.] *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2012. No 4. P. 3-5.
7. Gol'denveyzer A.L. Teoriya uprugikh tonkikh obolochek [Theory of elastic thin shells]. Moscow: GTTI, 1953. 544 p.
8. Krivoshapko S.N. Dva vida raschetnykh uravneniy dlya obolochek v proizvol'nykh krivolineynykh koordinatakh [Two types of calculation equations for shells in arbitrary curvilinear coordinates]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2017. No 1. Pp. 15-22.
9. Rynkovskaya M., Ivanov V. Analytical method to analyze right helicoid stress-strain. *Advanced Structured Materials*. 2019. Vol 92. Pp. 157-171.
10. Krivoshapko S.N. Static analysis of shells with developable middle surfaces. *Applied Mechanics Reviews*. Vol.51. No12, Part 1. December 1998. Pp. 731-746.
11. Krivoshapko S.N., Mamiyeva I.A. Vydayushchiyesya prostranstvennyye sooruzheniya poslednikh 20 let [Outstanding spatial structures of the last 20 years]. *Montazhnyye i spetsial'nyye raboty v stroitel'stve*. 2012. No 12. Pp. 8-14.
12. Schober Hans, Justiz Stefan, Tamai Hiroki. Speed and grace. *Civil Engineering*. 2011. February. Pp. 54-59
13. Logunova M.V., Khadidan Mokhamed Seyf-yeddin, Bussakha Fetkhi. Geometricheskiye formy obolochek v arkhitekturnom konstruirovanii [Geometric forms of shells in architectural design]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2017. No 08(62). Part 1. Pp. 140-143.

14. Ivanov V.N., Romanova V.A. Konstruktsionnyye formy prostranstvennykh konstruktsiy. Vizualiza-tsiya poverkhnostey v sistemakh MathCad, AutoCad [Structural forms of spatial structures. Visualization of surfaces in MathCad, AutoCad systems]. Moscow: Izd-vo ASV, 2016. 412 p.
15. Krivoshapko S.N. Obzor sovremennogo sostoyaniya teorii obolochek slozhnoy geometrii i obolochek v forme analiticheski neopredelimykh poverkhnostey [A review of the current state of the theory of shells of complex geometry and shells in the form of analytically indefinable surfaces]. *Montazhnyye i spets. raboty v stroitel'stve*. 1998. No 5. Pp. 24-28.
16. Zhukovskiy E.Z., Shilobreyev YU.A., Shevchenko O.V. Bol'sheproletnyye prostranstvennyye konstruk-tsii v mirovoy praktike [Large-span spatial constructions in world practice]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 1990. No 5. Pp. 87-91.
17. Yeremeyev P.G. Metallicheskiye konstruktsii pokrytiy unikal'nykh bol'sheproletnykh sooruzheniy [Metal structures for coatings of unique wide-span structures]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2007. No 3.
18. Mamiyeva I.A. O podgotovke spetsialistov po arkhitekture, geometrii i raschetu bol'sheproletnykh pro-stranstvennykh struktur i obolochek [On the training of specialists in architecture, geometry and the calculation of large-span spatial structures and shells]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No 5 (67). Pp. 114-118.
19. Krivoshapko S.N. O vozmozhnostyakh obolochechnykh sooruzheniy v sovremennoy arkhitekture i stroitel'stve [On the possibilities of shell structures in modern architecture and construction]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy*. 2013. No 1. Pp. 51-56.
20. Mamiyeva I.A. Analiticheskiye poverkhnosti dlya parametricheskoy arkhitektury v sovremennykh zdani-yakh i sooruzheniyakh [Analytical surfaces for parametric architecture in modern buildings and structures]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2020. No 1.

Информация об авторах

Кривошاپко Сергей Николаевич

ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов (РУДН)», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор департамента строительства Инженерной академии РУДН.
E-mail: sn.krivoshapko@mail.ru

Information about authors

Krivoshapko Sergey N.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia,
Doctor in Technical Science, Professor, Professor of Department of Civil Engineering of Engineering Academia
E-mail: sn.krivoshapko@mail.ru