



УДК 669.018-419.8(035)

DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-1-70-78

ЗОНТИЧНЫЕ ОБОЛОЧКИ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ СПОРТИВНОГО ЦЕНТРА

А.А. Козырева, М.И. Рынковская, Е.М. Тупикова

Инженерная академия
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

В статье приведены существующие реальные примеры применения зонтичных оболочек и куполов, методы их формообразования, указана литература по расчету их на прочность, а также рассмотрены перспективы их дальнейшего использования. Описаны две инновационные зонтичные поверхности с шестью тождественными элементами, предложенные для внедрения на кафедре прочности материалов и конструкций РУДН, применение которых проиллюстрировано в покрытии части спортивного комплекса.

Статья написана на основе материалов магистерской диссертации А.А. Козыревой.

Ключевые слова: поверхность зонтичного типа, зонтичный купол, спортивный центр, вариационно-разностный метод

Введение

Поверхностью зонтичного типа называются циклически симметричные поверхности, состоящие из нескольких тождественных элементов [1]. Полная поверхность зонтичного типа и все поверхности составляющих ее тождественных элементов описываются одним и тем же явными, неявными или параметрическими уравнениями.

Известные в настоящее время поверхности зонтичного типа можно подразделить на следующие виды:

- поверхность с радиальными волнами, затухающими в центре, образованная параболодами;
- поверхность с радиальными волнами, затухающими в центре, образованная кубическими параболодами;
- крестообразный желоб;
- волнистая эллипсоидальная поверхность;
- линейчатая поверхность Скидана;
- поверхность зонтичного типа с синусоидальной образующей;
- волнистая поверхность с псевдовершинами на круглом плане;
- гофрированный параболоид вращения;
- волнистая поверхность из кубических парабол;
- поверхность зонтичного типа на циклоидальном плане, образованная кубическими параболодами.

Все эти поверхности заданы уравнениями, описаны их формы в зависимости от значения их геометрических параметров и представлены визуально посредством Microsoft Word в [1–5].

Самопересекающиеся поверхности зонтичного типа можно получить также из параметрических уравнений задания поверхности Сиверта, если брать определенные пределы изменения геометрического параметра u [1].

Зонтичные оболочки иногда также называются волнистыми, волнообразными или волновыми. В некоторых работах их относят к поверхностям конгруэнтных сечений, которые несут на себе непрерывное однопараметрическое семейство плоских линий.

Зонтичный купол (купол с распалубкой) — циклически симметричная пространственная конструкция, образованная из нескольких тождественных элементов, в результате пересечения срединных поверхностей которых получаются кривые, являющиеся образующими некоторой куполообразной поверхности вращения.

Аналитические уравнения зонтичных поверхностей крайне редко указываются в источниках литературы архитектурного направления, поэтому в большинстве случаев можно только примерно предположить, к какому типу зонтичной поверхности относится тот или иной пример реального сооружения.

Зонтичные купола можно увидеть в таких древних сооружениях, как, например, построенная в 134 г. вилла в Италии (рис. 1) или мавзолей XI—XII вв. Бабаджа Хатун в Казахстане (рис. 2), в покрытии которого применен 16-реберный зонтичный купол на конической круговой контурной поверхности.



Рис. 1. Вилла в Тиволи (Италия, 134 г.)
[Villa in Tivoli (Italy, 134 year)]

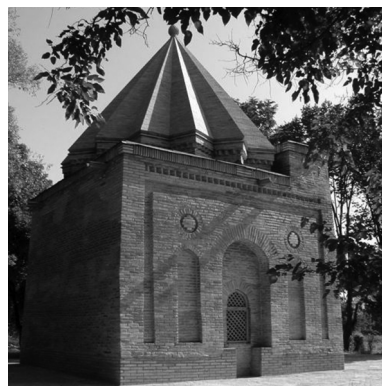


Рис. 2. Мавзолей Бабаджа Хатун (11—12 вв.)
[Mausoleum of Babaj Khatun (11—12 century)]

Более современные примеры зонтичных оболочек дал Феликс Кандела (27.01.1910—07.12.1997), который использовал проектную архитектуру тонкостенных железобетонных оболочек сложных форм и стремился преобразовать объекты в выразительные формы, исходя из идей со сводчатыми конструкциями по аналогии со своими коллегами, знаменитыми архитекторами и инженерами А. Гауди и Э. Торрохи. Ф. Кандела запроектировал около трехсот зонтичных пространственных оболочек, например ресторан в Хочимилько в Мексике (1957—1958 гг.).

Примерно в то же время Н.В. Лебедев [6] активно занимался изучением зонтичных куполов и предлагал классифицировать их по виду контурной поверхности, по виду кривой, образующей срединную поверхность тождественных элементов и по соотношению главных размеров (диаметра и высоты купола). Морозов А.П. и др. [7] предложили выделить зонтичные купола из зонтичных оболочек.

В 2007 году идея применения зонтичных оболочек была поддержана молодыми учеными Рынковской М.И., Алборовою Л.А. и Емельяновой Е.М. (рис. 3) в научно-исследовательской работе «Формообразование неканонических оболочек применительно к сооружениям на Земле и во Вселенной». Эта работа получила по результатам конкурса молодежных инновационных проектов «Полет мысли: авиация и космонавтика» в рамках VIII Международного авиационно-космического салона (МАКС-2007) 3-е место. В проекте было показано, что при проектировании сооружений в виде поверхностей зонтичного типа в условиях повышенного внешнего давления из материалов типа железобетона целесообразно применять оболочки выпуклого контура, чтобы конструкция испытывала сжимающие напряжения, а при строительстве в условиях меньшего по сравнению с атмосферным давления, например на Луне, по тем же причинам предпочтительнее использовать вогнутые зонтичные оболочки (рис. 4, а, б).



Рис. 3. Победители конкурса в рамках МАКС-2007
[Winners of the contest MAKS-2007]

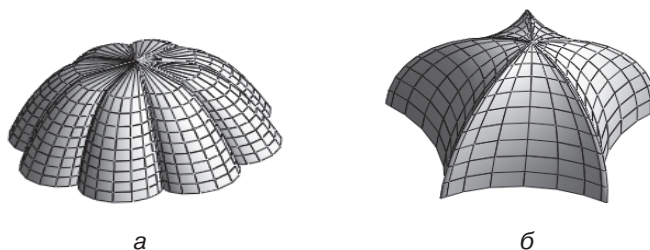


Рис. 4. Зонтичные оболочки с выпуклым (а) и вогнутым (б) контуром
[Umbrella shells with (a) convex and (б) concave contour]

Помимо прочего к преимуществам поверхностей зонтичного типа можно отнести следующее: они состоят из тождественных элементов; обладают повышенной жесткостью, устойчивостью, архитектурной выразительностью; просты в изготовлении; возможно применение робототехники.

В работе [8] были показаны новые формы зонтичных циклических поверхностей для большепролетных покрытий сооружений.

В 2011 году в рамках проекта спортивно-развлекательного комплекса, в формообразовании которого решено было применить минимальное количество плоскостей и прямых линий, для покрытия части здания было предложено использовать три новые оболочки, в том числе со срединными зонтичными поверхностями [9].

Математическое обоснование построения оболочек со срединными зонтичными поверхностями рассматривается в работе [10], в которой была показана возможность конструирования зонтичных оболочек из отсеков циклических поверхностей переноса, ограниченных опорными меридианами базовой сферы. Было доказано, что каждый элемент поверхности представляет собой циклическую поверхность, а совокупность элементов — зонтичную поверхность. В статье [3] были собраны воедино все известные на то время описания зонтичных поверхностей и поверхностей зонтичного типа и предложены новые их формы.

Цель работы

В настоящее время решены многие теоретические вопросы по формообразованию и заданию рассматриваемых поверхностей. Цель работы — показать возможность внедрения данных поверхностей в реальных сооружениях, пути решения задачи построения зонтичного купола по заданным геометрическим параметрам (размерам) и показать возможность их расчета на прочность (рис. 5).

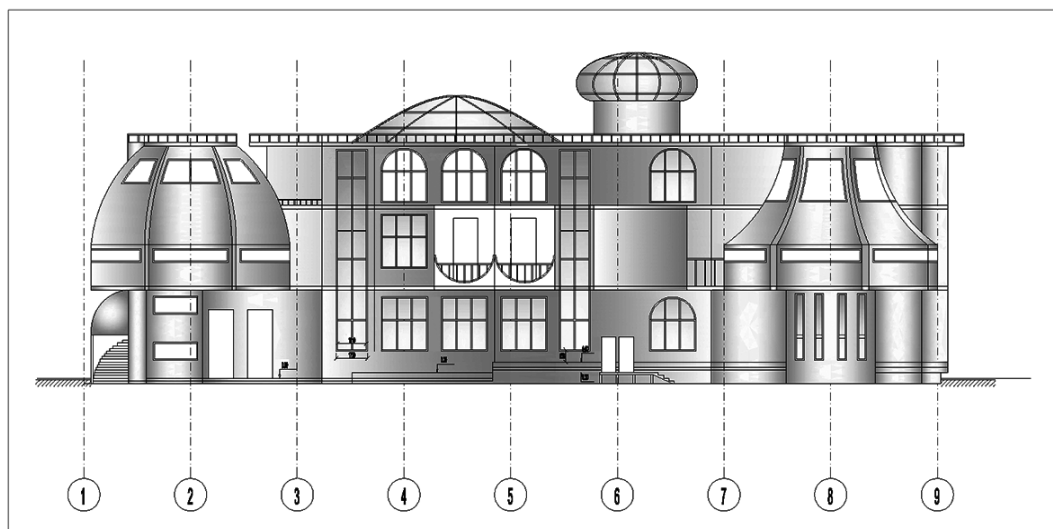


Рис. 5. Фасад спортивного центра (проект)
[Facade of the sports center (project)]

Материалы и методы

В зависимости от применяемых материалов и технологий зонтичные оболочки обычно бывают из монолитного или сборно-монолитного железобетона, а также тентовые и пневматические. Известны случаи возведения предварительно напряженных зонтичных оболочек (например, Олимпийский плавательный бассейн, построенный в 1982 г. в Люксембурге), а также различных легких палаток (для зимней рыбалки и т.д.).

Область использования и применения тентовых покрытий в современной архитектуре с каждым годом расширяется в связи с необходимостью перекрытия все больших площадей, а также стремлением к постоянному обновлению ландшафта в соответствии с конкретным культурно-массовым мероприятием. На первый план выходят такие качества сооружений, как легкость, экономичность, быстрота монтажа/демонтажа, комбинаторные свойства и способность к эстетическому многообразию. На практике одним из наиболее популярных видов таких покрытий стали модульные зонтичные оболочки, но возможности их формообразования пока мало изучены, что в целом ограничивает спектр возможностей применяемых форм и материалов.

Зонтичный купол занимает не последнее место в архитектуре нашего времени, например, в 2009 г. в Пуэрто-Рико был построен ресторан в форме зонтичной оболочки, отличительной особенностью которой стало соотношение основных геометрических размеров оболочки (диаметр примерно соответствует высоте, хотя обычно принимается значительно больше высоты).

В качестве одного из примеров инновационного применения зонтичных оболочек авторами предлагается проект спортивного центра, части покрытия которого выполнены в форме двух типов оболочек с зонтичными срединными поверхностями (см. рис. 5). Некоторые варианты внешнего вида покрытий представлены на рис. 6.

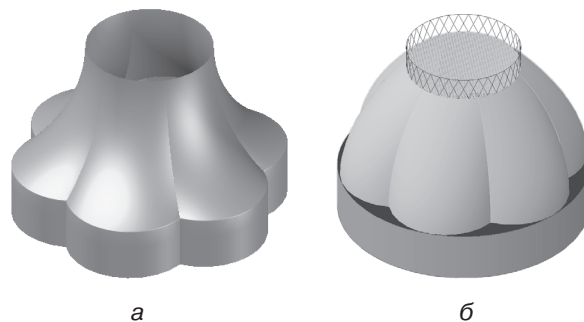


Рис. 6. Две зонтичные оболочки для части покрытия спортивного центра (проект)
[Two umbrella casings for part of the sports center roof (project)]

Результаты и обсуждение

В работе показаны конкретные варианты применения двух инновационных типов зонтичных оболочек с круговыми образующими одного радиуса применительно к конструкциям покрытия спортивного центра.

Если рассматривать зонтичные оболочки с точки зрения развития конструкций из сборного железобетона, то они могут оказаться достаточно интересными, поскольку позволяют создавать необычные формы и перекрывать большие пространства без применения уникальной и дорогостоящей опалубки, путем соединения тождественных сборных элементов.

В то же время с появлением параметрической архитектуры и программных комплексов, позволяющих ее реализовывать (Rhinoceros), а также с развитием строительных технологий (3D печати зданий) и материалов, в том числе композитных, вопрос о дальнейшем распространении зонтичных оболочек самых замысловатых типов, выполненных из монолитного железобетона (и других видов материалов) также представляется достаточно перспективным.

Однако в связи с крупными авариями и разрушениями конструкций покрытий в виде различных типов оболочек (авария в аквапарке в 2004 г. в Москве и др.) [11], повлекшими за собой гибель людей, необходимо очень серьезно подходить к расчету таких конструкций с учетом принципов образования поверхностей, условий работы и фактической прочности используемых материалов.

Так, в 2006 г. С.М. Докула [12] писал, что «в проектировании конструкций отсутствуют совершенные принципы образования поверхностей зонтичных куполов, а также точные методы их расчета. Те нестрогие определения зонтичной поверхности, как поверхности, образованной из куполов вращения путем членения их «вздутыми» и «ложкообразными» распалубками, не могут служить ни цели создания поверхности зонтичных куполов, ни, тем более, цели достаточно точного их расчета. ... Тем не менее, зонтичная форма куполов неизменно интересовала и интересует архитекторов и строителей и они, не ожидая способа образования и метода расчета, предпринимают попытки осуществления, в наше время подобных куполов, трактуя их как модуляцию сводов двойкой кривизны». В то же время в 2008 году профессором Ивановым В.Н. была успешно предпринята попытка расчета напряженно-деформированного состояния покрытия торгового центра в форме оболочки зонтичного типа вариационно-разностным методом [13].

Можно сказать, что мягкие зонтичные оболочки обладают самым главным преимуществом над всеми оболочками: при той же площади покрытия количество опор уменьшено, но в организации наружного ограждения требуется специальный каркас. По этим причинам эти оболочки применяют только в тех сооружениях, где отсутствует необходимость наружных ограждений (временные павильоны, летние кафе).

Заключение

В дальнейшем авторами планируется произвести расчет конструкции представленных двух инновационных типов зонтичных оболочек численным методом для дополнительного анализа полученных результатов. В случае успешного завершения данной работы может быть подтверждена актуальность использования данного вида оболочек в современном мире.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что зонтичные оболочки имеют достаточно хорошие перспективы для развития как с точки зрения

совершенствования методов расчета [4] и технологий строительства [10], так и с точки зрения архитектуры [13; 14].

© Козырева А.А., Рынковская М.И., Тупикова Е.М., 2017

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] *Кривошапко С.Н., Иванов В.Н.* Энциклопедия аналитических поверхностей. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 560 с.
- [2] *Кривошапко С.Н.* Геометрические исследования поверхностей зонтичного типа // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2005. № 1. С. 11—17.
- [3] *Кривошапко С.Н., Мамиева И.А.* Зонтичные поверхности и поверхности зонтичного типа в архитектуре // *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. № 7(1). С. 27—31.
- [4] *Иванов В.Н.* Расчет напряженно-деформированного состояния покрытия торгового центра в форме оболочки зонтичного типа вариационно-разностным методом // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2008. № 4. С. 86—89.
- [5] *Ch.A. Bock Hueng, Krivoshapko S.N.* Umbrella-Type Surfaces in Architecture of Spatial Structures // *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2013. Vol. 3, Iss. 3. Pp. 43—53.
- [6] *Лебедев Н.В.* Фермы, арки, тонкостенные пространственные конструкции. М.: Архитектура-С, 2006. 120 с.
- [7] *Морозов А.П., Василенко О.В., Миронков Б.А.* Пространственные конструкции общественных зданий. Л.: Стройиздат, Ленинградское отд., 1977. 168 с.
- [8] *Иванов В.Н., Рынковская М.И.* Применение циклических поверхностей в архитектуре зданий, конструкций и изделий // *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. № 3. 2015. С.111—119.
- [9] *Кривошапко С.Н., Емельянова Е.М., Мамиева И.А.* Объемно-планировочные решения спортивно-развлекательного комплекса // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2011. № 4. С. 46—49.
- [10] *Иванов В.Н., Кривошапко С.Н.* Конструирование зонтичных оболочек из отсеков циклических оболочек переноса // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2011. № 1. С. 3—7.
- [11] *Кривошапко С.Н.* Виды аварий и разрушений пространственных структур и оболочек // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 1(57). С. 22—32.
- [12] *Докула С.М.* Место зонтичных куполов в современной архитектуре. 2006. <http://www.gusnauka.com>.
- [13] *Романова В.А.* Визуализация образования поверхностей с радиальными волнами, затухающими в центральной точке // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2015. № 3. С. 4—8.
- [14] *Segal Edward.* The thin concrete shells of Jack Christiansen // *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures 28 September — 2 October 2009, Universidad Politecnica de Valencia, Spain* Alberto DOMINGO and Carlos LAZARO (eds.). 1622—1633.

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 5 декабря 2016

Дата принятия к печати: 22 января 2017

Для цитирования:

Козырева А.А., Рынковская М.И., Тупикова Е.М. Зонтичные оболочки для покрытия спортивного центра // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2017. Т. 18. № 1. С. 70—78.

Сведения об авторах:

Козырева Анна Андреевна, магистрант департамента архитектуры и строительства, инженерная академия, Российский университет дружбы народов. *Сфера научных интересов:* архитектура и определение напряженно-деформированного состояния зонтичных и велароидальных тонких оболочек. *Контактная информация:* e-mail: kozyrevaanna5@gmail.com.

Рынкoвская Марина Игоревна, кандидат технических наук, доцент департамента архитектуры и строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов. *Сфера научных интересов:* формообразование и расчет тонких упругих оболочек, в частности, расчет прямых и развертывающихся геликоидов, применение винтовых оболочек в строительстве и архитектуре. *Контактная информация:* e-mail: rynkovskaya_mi@rudn.university.

Тупикова Евгения Михайловна, ассистент департамента архитектуры и строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов. *Сфера научных интересов:* формообразование и расчет тонких упругих оболочек, в частности, расчет косых геликоидов, применение винтовых оболочек в строительстве и архитектуре. *Контактная информация:* e-mail: emelian-off@yandex.ru.

UMBRELLA TYPE SURFACE FOR A SPORTS CENTER

Anna Kozyreva, Marina Rynkovskaya, Evgeniya Tupikova

Engineering Academy
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The practical examples of umbrella-type shells and domes, methods of their genesis are given in the article, the prospects for future application are considered. Two innovational umbrella type surfaces of six equal elements, proposed for adaptation by Strength of materials department of PFUR, their application illustrated by the sports center roof.

Key words: umbrella type surface, umbrella dome, sports center, variational-difference method

REFERENCES

- [1] Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. (2010) Enciklopediya analiticheskikh poverkhnostey. M.: LIBROKOM. (In Russ)
- [2] Krivoshapko S.N. (2005) Geometricheskie issledovaniya poverkhnostey zontichnogo tipa. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 1. 11–17. (In Russ)
- [3] Krivoshapko S.N., Mamieva I.A. (2011) Zontichnye poverkhnosti i poverkhnosti zontichnogo tipa v arkhitekture. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 7(1). 27–31. (In Russ)
- [4] Ivanov V.N. (2008) Joachimsthal's channel surfaces with the directrix curves of the 2-nd order. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 4. 86–89. (In Russ)
- [5] Ch.A. Bock Hyeng, Krivoshapko S.N. (2013) Umbrella-Type Surfaces in Architecture of Spatial Structures. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. Vol. 3, Iss. 3. 43–53.
- [6] Lebedev N.V. (2006) Fermi, arki, tonkostennye prostranstvennyye konstrukcii. M.: Arkhitektura-S. (In Russ)

- [7] Morozov A.P., Vasilenko O.V., Mironkov B.A. (1977) Prostranstvennyye konstrukcii obshchestvennykh zdaniy. L.: Stroyizdat, Leningradskoe otd. (In Russ)
- [8] Ivanov V.N., Rynkovskaya M.I. (2015) Primenenie ciklicheskikh poverkhnostey v arkhitekture zdaniy, konstrukciy i izdeliy. *RUDN Journal of Engineering Researches*. No 3. 111—119. (In Russ)
- [9] Krivoshapko S.N., Emelyanova E.M., Mamieva I.A. (2011) Obemno-planirovochnye resheniya sportivno-razvlekatelnogo kompleksa. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 4. 46—49. (In Russ)
- [10] Ivanov V.N., Krivoshapko S.N. (2011) Konstruirovaniye zontichnykh obolochek iz otsekov ciklicheskikh obolochek perenosa. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 1. 3—7. (In Russ)
- [11] Krivoshapko S.N. (2015) Vidy avariy i razrusheniy prostranstvennykh struktur i obolochek. *Stroitelstvo i rekonstrukciya*. 1(57). 22—32. (In Russ)
- [12] Dokula S.M. (2006) Mesto zontichnykh kupolov v sovremennoy arkhitekture. <http://www.rusnauka.com>. (In Russ)
- [13] Romanova V.A. (2015) Vizualizaciya obrazovaniya poverkhnostey s radialnymi volnami, zatukhayushchimi v centralnoy tochke. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 3. 4—8. (In Russ)
- [14] Segal Edward. The thin concrete shells of Jack Christiansen// Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures 28 September — 2 October 2009, Universidad Politecnica de Valencia, Spain Alberto DOMINGO and Carlos LAZARO (eds.). 1622—1633.

Article history:

Received: December 5, 2016

Accepted: January 22, 2017

For citation:

Kozyreva A.A., Rynkovskaya M.I., Tupikova E.M. (2017) Umbrella shells sports center cover. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(1), 70—78.

Bio Note:

Anna A. Kozyreva, student master of of architecture and civil engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research Interests*: architecture and definition of stress-strain state umbrella melanoidin and thin shells. *Contact information*: e-mail: kozyrevaanna5@gmail.com.

Marina I. Rynkovskaya, PhD in Structural Mechanics, associate professor of department of architecture and civil engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research Interests*: thin elastic shells formation and calculation, in particular, right and developable helicoids analysis, application of helical structures in civil engineering and architecture. *Contact information*: e-mail: rynkovskaya_mi@rudn.university.

Evgeniya M. Tupikova, assistant professor of department of architecture and civil engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research Interests*: thin elastic shells formation and calculation, in particular, oblique helicoids analysis, application of helical structures in civil engineering and architecture. *Contact information*: e-mail: emelian-off@yandex.ru.