

# АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК624.04

## ПРИМЕНЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В АРХИТЕКТУРЕ ЗДАНИЙ, КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ

**В.Н. Иванов, М.И. Рынковская**

Кафедра Прочности материалов и конструкций  
Инженерный факультет  
Российский университет дружбы народов  
*ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198*

В статье показаны основные достижения строительной науки в области создания тонко-стенных пространственных конструкций на основе циклических поверхностей, которые используются для выбора формы общественных и жилых зданий, в виде фрагментов аттракционов в спортивно-развлекательных центрах, на детских площадках. Часто эти поверхности являются единственно возможным техническим решением, например, в формах пружин различного назначения. Предложены новые формы циклических поверхностей для внедрения их в практику проектирования тонких оболочек и в качестве соединительных частей трубопроводов.

**Ключевые слова:** архитектура оболочек, циклическая поверхность, трубчатая поверхность, тонкая оболочка, архитектурная бионика, соединительные части трубопроводов.

**Введение.** Одно семейство образующих кривых в циклических поверхностях представляют собой окружности постоянного или переменного радиуса, что значительно удешевляет стоимость и упрощает процесс изготовления тонких оболочек без снижения их эксплуатационных возможностей. Однако до середины XX в. точный аналитический расчет циклических оболочек был заменен приближенным расчетом относительно простых систем, на которые можно было расчленить конструкцию, что сдерживало их расширенное применение. Инженеры, механики и архитекторы, используя только приближенные методы расчета, в основном проведенные на основании интуитивных соображений или с применением экспериментальных данных, создали немало интересных конструкций и сооружений в форме циклических поверхностей.

Геометрия циклических поверхностей общего вида впервые была рассмотрена в работе [1]. До настоящего времени самой распространенной циклической по-

верхностью является трубчатая поверхность, но в монографии [2] отмечается, что до 1990 г. в российской и зарубежной технической литературе редко встречались материалы по расчету трубчатых оболочек. К одной из первых работ, посвященных расчету трубчатых оболочек с произвольной плоской линией центров, можно отнести статью [3] и диссертацию [4]. Наиболее полно аналитические и численные методы, применяемые для расчета на прочность циклических оболочек, изложены в монографии [5].

Цель настоящей статьи — расширить представления о возможном применении циклических поверхностей в различных сферах деятельности человека. Немного ранее это пытались сделать авторы работ [6; 7]. Раздел «Циклические поверхности» включен во все учебники и учебные пособия по начертательной геометрии и инженерной графике для строительных и машиностроительных вузов, что подтверждает возможность их широкого практического применения.

**Терминология и применение циклических поверхностей в реальных конструкциях и рекомендации для внедрения новых форм.** *Циклическая поверхность* образуется движением окружности переменного или постоянного радиуса по произвольному закону в пространстве. Уравнение циклической поверхности в векторной форме имеет вид

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = \rho(u) + R(u)\mathbf{e}(u, v),$$

где  $\mathbf{r}(u, v)$  — радиус-вектор циклической поверхности;  $\rho(u)$  — радиус-вектор направляющей кривой (линии центров образующих окружностей);  $R(u)$  — закон изменения радиуса образующих окружностей;  $\mathbf{e}(u, v)$  — вектор-функция окружности единичного радиуса в плоскости образующей окружности с нормалью  $\mathbf{n}(u)$ ;  $v$  — полярный угол в плоскости образующей окружности.

Циклические поверхности являются классом поверхностей, включающим множество подклассов. Циклические поверхности включают в себя как хорошо известные группы, так и поверхности, известные узкому кругу геометров [8]. Некоторые циклические поверхности одновременно входят и в другие классы поверхностей. Например, подгруппа циклических поверхностей «Поверхности вращения» одновременно составляет отдельный класс одноименных поверхностей.

Описание подклассов циклических поверхностей и особенности их геометрии можно найти в работе [6]. В Энциклопедии аналитических поверхностей [9] приводятся определения, уравнения и геометрические характеристики всех известных циклических поверхностей.

Из циклических поверхностей с прямой линией центров всем хорошо известны круговые цилиндрические поверхности, которые можно увидеть в формах сотен сооружений, поэтому ограничимся только одним примером (рис. 1, *a*) реального сооружения, а с некоторыми примерами проектов, разработанных на основе цилиндрических поверхностей на кафедре прочности материалов и конструкций, можно ознакомиться в работе [10].

В строительстве наиболее значимых объектов сотни лет широко использовались поверхности вращения. Это объясняется прежде всего наиболее простым

формообразованием этих сооружений из систем окружностей и прямой линии центров. Во второй половине XX в. архитекторы все чаще стали использовать более сложные формы вращения для создания современного облика городских застроек (рис. 1, б).



а



б



в



г

**Рис. 1.** Примеры применения циклических поверхностей в архитектуре:

а — офисное здание в Вене, Австрия; б — James Law's High Tech 'Cybertecture Egg' for Mumbai;

в — торговый центр в Челябинске (102 × 102 м);

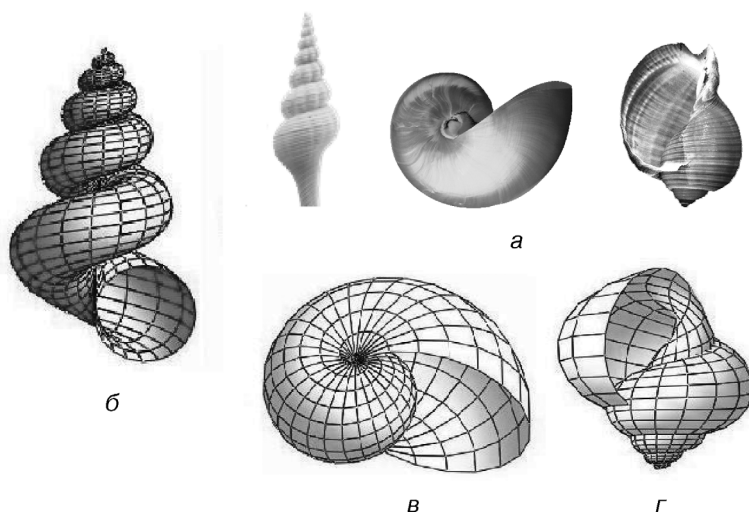
г — садовая скульптура в г. Дмитров Московской области

Среди других форм циклических поверхностей для перекрытия больших пролетов в промышленном и гражданском строительстве используются бочарные своды, пологие круговые оболочки переноса на прямоугольном плане и шедовые покрытия. Названные поверхности относятся к подклассу циклических поверхностей с плоскостью параллелизма, когда поверхность образуется движением окружности переменного или постоянного радиуса параллельно некоторой плоскости. Если радиус окружности постоянный, то такая поверхность называется круговой поверхностью переноса. Ярким представителем тонких оболочек с круговой поверхностью переноса является покрытие торгового центра в Челябинске (см. рис. 1, в).

Садово-парковая архитектура также может быть сферой применения циклических поверхностей. Это можно проиллюстрировать садовой скульптурой на бульваре в г. Дмитров Московской области (см. рис. 1, г), которая представляет

собой циклическую оболочку с образующей окружностью переменного радиуса и направляющей кривой синусоидального вида.

Самые разнообразные формы циклических поверхностей можно обнаружить в ракушках речных и морских моллюсков (рис. 2, *а*). На рис. 2, *б, в, г* представлены циклические поверхности, которые могут быть математическими моделями ракушек: рис. 2, *б* — «морская ракушка»; рис. 2, *в* — циклическая поверхность с образующей окружностью в плоскостях пучка; рис. 2, *г* — «речная улитка» [9].



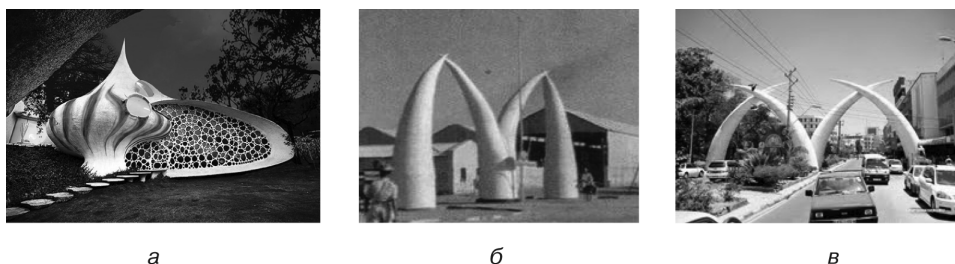
**Рис. 2.** Примеры циклических поверхностей в форме морских моллюсков: *а* — реальные формы речных и морских моллюсков; *б* — математическая модель «морская ракушка»; *в* — математическая модель с образующей окружностью в плоскостях пучка; *г* — математическая модель «речная улитка»

В конце XX и начале XXI вв. некоторые архитекторы увлеклись проектированием жилых помещений в стиле архитектурной бионики. Появились сооружения «дом-улитка», «дом-кот», экологические дома и т.д. Мексиканский вариант «дома-улитки» построен в 2006 г. по проекту архитектора Х. Сеносьяна (Javier Senosiain Aguilar) (рис. 3, *а*). Его форма может быть аппроксимирована циклической поверхностью с образующей окружностью в плоскостях пучка (см. рис. 2, *в*).

В азиатских и африканских странах округлые формы в малой архитектуре, копирующие фрагменты животных организмов, присутствуют уже давно (рис. 3, *б, в*) и органично вписываются не только в окружающую среду, но и в мировоззрение людей, находящихся в более тесном контакте с природой. Представленные на рис. 3, *б, в* объекты можно описать циклическими поверхностями с плоскостью параллелизма [9].

В западном же мире биоархитектура возникла в результате «усталости» от всеобщей индустриализации и постмодернизма, скорее как утопия, как пример идеального жилья. Однако в связи с все нарастающей современной тенденцией к экологичности, слиянию с природой, поиску новых форм и психологического комфорта есть вероятность, что биоархитектура может войти в массовое сознание как минимум при строительстве современных музеев, общественных зданий и частных домов. Это может привести к расширению применения циклических поверхностей, так как ими легко аппроксимировать многие формы живых орга-

низмов. Знакомство с принципами формообразования циклических поверхностей поможет как архитекторам, так и строителям подойти более подготовленными к вопросу проектирования интересных и уникальных сооружений в стиле архитектурной бионики.



**Рис. 3.** Примеры применения циклических поверхностей в архитектурной бионике: а — «дом-улитка» в Мексике; б — арки в форме бивней слона в Хартуме, Судан; в — арки в форме бивней слона в Момбаса, Кения



**Рис. 4.** Примеры применения нормальных циклических поверхностей: а — аттракцион «Бивни мамонта» в г. Геленджик [11]; б — спиральные горки в аквапарке в г. Евпатория [12]; в — открытая горка на детской площадке в районе Ясенево, г. Москва; г — закрытая горка на детской площадке в г. Воронеж [13]

Циклические поверхности применяются при создании современных развлекательных аттракционов, аквапарков, детских площадок в жилых кварталах. Здесь используются нормальные циклические поверхности, образующие окружности которых лежат в нормальной плоскости линии центров в виде винтовых и спиральных линий (см. рис. 4, а, б). При постоянном радиусе образующей окруж-

ности получаем трубчатую поверхность. На рис. 4, *а, б* показаны аттракционы в аквапарках: рис. 4, *а* — «бивни мамонта», рис. 4, *б* — спиральные горки в аквапарке Евпатории. На рис. 4, *в, г* представлены детские площадки: рис. 4, *в* — в Ясенево (Москва); рис. 4, *г* — в г. Воронеж на бульваре Победы.

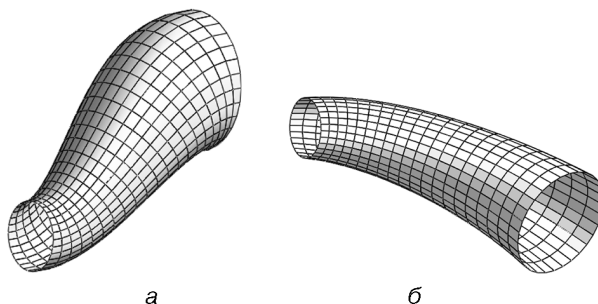
В технике циклические поверхности также получили широкое распространение. Так, трубчатую винтовую поверхность можно видеть в очертаниях цилиндрических винтовых пружин. Трубчатые винтовые и спиральные поверхности используются в виде спирального нагревательного элемента в электроплитках, аппаратах по перегонке жидкостей, современных энергосберегающих электролампах.

В промышленном строительстве нормальные циклические и трубчатые конструкции используются в трубопроводах и их соединительных элементах (рис. 5), сосудах высокого давления.



**Рис. 5.** Примеры применения трубчатых конструкций в трубопроводах и их соединениях

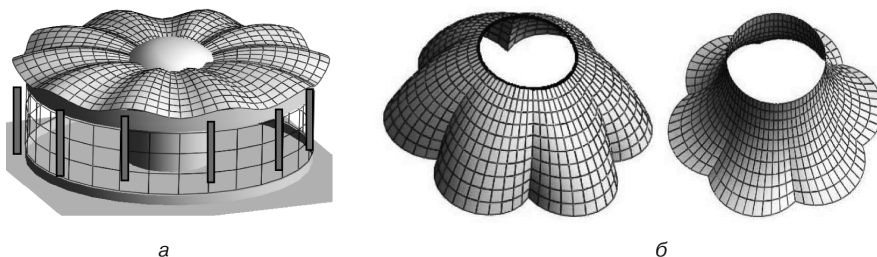
**Рекомендации по внедрению новых форм циклических поверхностей.** На кафедре прочности материалов и конструкций РУДН вот уже много лет изучают геометрию и разрабатывают методы расчета на прочность циклических оболочек. Были предложены для внедрения некоторые технические решения с использованием циклических поверхностей. Например, для соединения трубопроводов разного диаметра, в том числе пересекающихся под произвольным углом или с параллельными осями, предлагается использовать соединительные элементы в форме циклических поверхностей, изображенных на рис. 6.



**Рис. 6.** Формы циклических поверхностей, предлагаемые к использованию: *а* — для соединения трубопроводов разного диаметра с параллельными осями; *б* — для соединения двух трубопроводов разного диаметра, пересекающихся под прямым углом (циклическая поверхность с эллиптической линией центров)

Зонтичные оболочки образуются из повторяющихся по кругу однотипных отсеков поверхностей.

На рисунке 7 представлены новые формы зонтичных циклических поверхностей для большепролетных покрытий сооружений, в частности предложена модель покрытия торгового центра (рис. 7, а) и две новые формы зонтичных оболочек (рис. 7, б, в).



**Рис. 7.** Новые формы зонтичных циклических поверхностей для большепролетных покрытий сооружений: а — модель покрытия торгового центра из фрагментов поверхности Иохимсталя; б — две новые формы зонтичных оболочек

На рис. 7, а каждый тождественный отсек зонтичной поверхности — фрагмент циклической поверхности Иохимсталя [14]. *Поверхности Иохимсталя* — циклические поверхности с семейством образующих окружностей в плоскостях пучка (линия центров образующих окружностей поверхности Иохимсталя — плоская кривая). Образующие окружности поверхности Иохимсталя являются линиями кривизны. Наср Юнес Аббуши [15] построил макеты поверхностей Иохимсталя, отражающих способы образования этих поверхностей (рис. 8).



**Рис. 8.** Макеты поверхностей Иохимсталя, отражающих способы образования этих поверхностей

Предложенные им формы циклических оболочек могут быть приняты за основу в некоторых проектах большепролетных сооружений. С.Н. Кривошапко и В.Н. Иванов [16] предложили для внедрения две новые формы зонтичных оболочек со срединными поверхностями, образованными движением окружности постоянного радиуса по контурным кривым, лежащим на сфере (см. рис. 7, б, в).

Эти две формы были взяты для применения в 2011 г. в проекте «Спортивно-развлекательный комплекс» (руководитель Е.М. Тупикова), который стал победителем конкурса «УМНИК-МФТИ-2011», а также в 2015 г. в проекте «Промышленный дизайн» (руководитель М.И. Рынковская) на соискание международной премии James Dyson Award.

**Заключение.** Приведенные примеры использования конструкций в форме циклических поверхностей не охватывают всего многообразия этого типа конструкций. В статье не рассматривались примеры промышленного применения цикли-

ческих поверхностей ввиду наличия большого объема информации по этой теме. Далеко не исчерпаны многообразные формы циклических поверхностей в создании новых архитектурных форм городской, парковой, внутридворовой и загородной застройки, спортивных и развлекательных сооружений. Авторы предлагают архитекторам и строителям обратить пристальное внимание на большой класс циклических оболочек, с помощью которых можно реализовывать достаточно сложные и интересные проекты, в том числе и заимствованные из окружающей природы. Зная о существовании большого выбора циклических поверхностей, архитекторы смогут творить, практически не ограничивая свои фантазии, а строители, в свою очередь, реализовывать проекты на основе строгих принципов математики, геометрического моделирования и формообразования, которые подробно рассмотрены в работах [1; 6; 8; 15], а также в Энциклопедии аналитических поверхностей [9].

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Иванов В.Н.* Геометрия циклических поверхностей // Сб. научных трудов аспирантов инженерного факультета. Вып. VIII. М.: УДН, 1971. С. 137—142.
- [2] *Гуляев В.И., Баженов В.А., Гоцуляк Е.А., Гайдайчук В.В.* Расчет оболочек сложной формы. Киев: Будивэльник, 1990. 192 с.
- [3] *Bantlin A.* Formanderung und Beauspruchung Ausgleichsrohren // *Z. Ver. Deut. Ing.* 1910. № 54. С. 43—49.
- [4] *Wissler H.* Festigkeitsberechnung von Ring flächenschalen, Technische Hochschule, Diss., Zürich, 1916.
- [5] *Кривошапко С.Н., Мамиева И.А.* Аналитические поверхности в архитектуре зданий, конструкций и изделий. М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 328 с.
- [6] *Кривошапко С.Н., Иванов В.Н.* Геометрия, расчет и проектирование конструкций в форме циклических поверхностей // Обзорная информация: Сер. «Строительные материалы и конструкции». М.: ОАО ВНИИИТПИ, 2010. Вып. 2. 61 с.
- [7] *Hueng Christian A. Bock, Yamb E.B.* Application of cyclic shells in architecture, machine design, and bionics // *International Journal of Modern Engineering Researches*. 2012. Vol. 2. Iss. 3. P. 799—806.
- [8] *Кривошапко С.Н., Иванов В.Н.* Классификация циклических поверхностей // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2006. № 2. С. 25—34.
- [9] *Кривошапко С.Н., Иванов В.Н.* Энциклопедия аналитических поверхностей. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 560 с.
- [10] *Rynkovskaya Marina, Simo Denis.* Cylindrical surfaces for social significant architectural projects in Cameroon // 3rd International Scientific Conference “moNGeometrija 2012”. Proc. Serbia, Novi Sad, June 21st-24th 2012. P. 487—498.
- [11] <http://lovegelen.ru/foto/35-akvaparki-gelendzhika-foto.html>
- [12] <http://moneytime.com.ua/poznay-mir/akvapark-evpatoriya-ceny-i-foto/.html>
- [13] [http://www.sigmask.ru/files/IMG\\_0162.jpg](http://www.sigmask.ru/files/IMG_0162.jpg)
- [14] *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.
- [15] *Наср Юнес Ахмед Аббуши.* Применение каналовых поверхностей Иоахимсталля в различных отраслях строительства // *Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования»*. 2002. № 1. С. 80—89.
- [16] *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.



## APPLICATION OF CIRCULAR SURFACES TO THE ARCHITECTURE OF THE BUILDINGS, STRUCTURES AND PRODUCTS

V.N. Ivanov, V.I. Rynkovskaya

Department of Strength of Materials and Structures  
Engineering Faculty  
Peoples' Friendship University of Russia  
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The article shows the main achievements of the construction science in the field of thin-walled spatial structures based on cyclical surfaces, which are used to choose the form of public and residential buildings, as fragments of attractions in sports and leisure centers, on playgrounds. Often, these surfaces are the only possible technical solution, for example in the form of springs for various purposes. It offers new forms of cyclic surfaces for introducing them to the practice of designing of thin shells and a pipeline connecting parts.

**Key words:** architecture shells, circular surface, tube surface, thin shell, architectural bionics, the connecting pipeline.

### REFERENCES

- [1] *Ivanov V.N.* The geometry of the circular surfaces. Vip. VIII. M.: UDN, 1971. P. 137—142.
- [2] *Gulyaev V.I., Bajenov V.A., Goculyak E.A., Gaydaychuk V.V.* Calculation of shells of complex shapes. Kiev: Budivelnik, 1990. 192 p.
- [3] *Bantlin A.* Formanderung und Beanspruchung Ausgleichsrohren // Z. Ver. Deut. Ing. 1910. № 54. P. 43—49.
- [4] *Wissler H.* Festigkeitsberechnung von Ring flächenschalen, Technische Hochschule, Diss., Zürich, 1916.
- [5] *Krivoshapko S.N., Mamieva I.A.* Analytic surfaces in the architecture of buildings, structures and products. M.: Knijnyi dom «LIBROKOM», 2012. 328 p.
- [6] *Krivoshapko S.N., Ivanov V.N.* Geometry, calculation and project of construction in cyclic forms // information: Ser. «Stroitelnye materialy i konstrukcii». M.: OAO VNIINTPI, 2010. Vip. 2. 61p.
- [7] *Hyeng Christian A. Bock, Yamb E.B.* Application of cyclic shells in architecture, machine design, and bionics // International Journal of Modern Engineering Researches. 2012. Vol. 2. Iss. 3. P. 799—806.
- [8] *Krivoshapko S.N., Ivanov V.N.* Classification of cyclic surfaces // Mechanical engineering and construction of structures and facilities. 2006. № 2. P. 25—34.
- [9] *Krivoshapko S.N., Ivanov V.N.* Encyclopedia of analytic surfaces. M.: Knijnyi dom «LIBROKOM», 2010. 560 p.
- [10] *Rynkovskaya Marina, Simo Denis.* Cylindrical surfaces for social significant architectural projects in Cameroon // 3rd International Scientific Conference “moNGeometrija 2012”. Proc. Serbia, Novi Sad, June 21st-24th 2012. P. 487—498.
- [11] <http://lovegelen.ru/foto/35-akvaparki-gelendzhika-foto.html>
- [12] <http://moneytime.com.ua/poznay-mir/akvapark-evpatoriya-ceny-i-foto/.html>
- [13] [http://www.sigmask.ru/files/IMG\\_0162.jpg](http://www.sigmask.ru/files/IMG_0162.jpg)
- [14] *Ivanov V.N.* Calculation of stress-strain state covering the shopping center in the form of shell umbrella type variational-difference method // Mechanical engineering and construction of structures and facilities. 2008. № 4. P. 86—89.
- [15] *Nasr Unes Ahmed Abbushi.* The use of canal Joachimsthal surfaces in various branches of construction // Bulletin of the Russian Peoples' Friendship University. Series “Engineering Research”. 2002. № 1. P. 80—89.
- [16] Construction of umbrella shells compartments cyclic transfer shells // Mechanical engineering and construction of structures and facilities. 2011. № 1. P. 3—7.