

# Эволюция формообразования аналитической ротативной поверхности

УДК 69.04

## Кравченко Г.М.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: Galina.907@mail.ru

## Труфанова Е.В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: El.Trufanova@mail.ru

## Шарап А.В.

Магистрант, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: mad.alina.sazonova@yandex.ru

## Пергат М.Э.

Студентка, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: marina.pergat@yandex.ru

Статья получена: 10.04.2019. Рассмотрена: 15.04.2019. Одобрена: 21.04.2019. Опубликовано онлайн: 26.06.2019. ©РИОР

**Аннотация.** Исследована эволюция формообразования ротативной поверхности, образованной произвольной пространственной кривой качением без скольжения подвижного торса по неподвижному торсу. Получена оптимальная форма для создания уникального архитектурного облика сооружения. Разработана конечно-элементная модель здания параметрической архитектуры методом конечных элементов. Для подтверждения правильности проектных решений выполнен динамический расчет и анализ полученных частот и форм собственных колебаний.

**Ключевые слова:** параметрическая архитектура, ротативная поверхность, метод конечных элементов, конечно-элементная модель.

Исследована эволюция формообразования ротативной поверхности, образованной произвольной пространственной кривой качением без скольжения подвижного торса по неподвижному торсу [1–2]. Производящая кривая совершает ротативное движение, при котором бесконечно малые последовательные перемещения кривой будут перемещениями вращения вокруг непрерывно изменяющейся оси [3]. Торсы, при помощи которых происходит движение производящей кривой линии, называются подвижными и неподвижными аксоидами. Плоскость, цилиндр, конус и прямая линия являются частными видами торса. Не любое сочетание аксоидов дает возможность осуществить ротативное

## EVOLUTION OF ANALYTICAL ROTATIVE SURFACE SHAPING Galina Kravchenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: galina.907@mail.ru

## Elena Trufanova

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: el.trufanova@mail.ru

## Alina Sharap

Master's Degree Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: mad.alina.sazonova@yandex.ru

## Marina Pergat

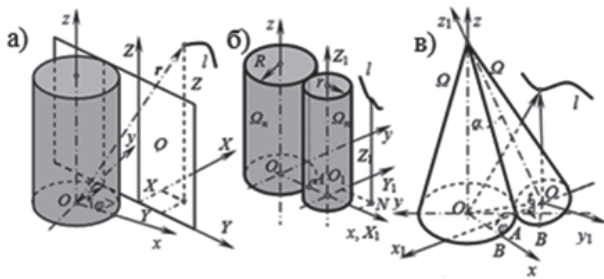
Bachelor's Degree Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: marina.pergat@yandex.ru

**Manuscript received:** 10.04.2019. **Revised:** 15.04.2019. **Accepted:** 21.04.2019. **Published online:** 26.06.2019. ©РИОР

**Abstract.** The evolution of the formation of a rotative surface formed by an arbitrary spatial curve by rolling without sliding the moving torso along the fixed torso is studied. The optimum form for creation of unique architectural appearance of a construction is received. The finite element model of the building of parametric architecture by the finite element method is developed. To confirm the correctness of the design solutions, the dynamic calculation and analysis of the obtained frequencies and Eigen frequencies were performed.

**Keywords:** parametric architecture, rotative surface, finite element method, finite element model.

движение — торс может катиться без скольжения только по своему изгибанию. Существует десять возможных сочетаний неподвижного и подвижного аксоидов: прямая — плоскость; плоскость — конус; плоскость — цилиндр; плоскость — торс; конус — плоскость; конус — конус; цилиндр — плоскость; цилиндр — цилиндр; торс — плоскость; торс — торс (рис. 1). Конус и цилиндр, цилиндр и торс не могут составить пар аксоидов для ротативного движения.



**Рис. 1.** Ротативные поверхности: а) аксоиды «цилиндр — плоскость»; б) аксоиды «цилиндр — цилиндр»; в) аксоиды «конус — конус»

Параметрическая форма поверхности описывается следующими функциями:

$$X = XU * (\cos(f) * \cos(v) * \cos(n * v) - \sin(v) * \sin(n * v)) + ZU * \sin(f) * \cos(v);$$

$$Y = XU * (\cos(f) * \sin(v) * \cos(n * v) + \cos(v) * \sin(n * v)) + ZU * \sin(f) * \sin(v);$$

$$Z = XU * \cos(n * v) * \sin(f) - ZU * \cos(f);$$

Переменные:  $XU = -b * (u - c) * (u - c) / (c * c) + b$ ;  $ZU = a + u$ ,

где  $b$  — радиус кривизны оболочки;

$c$  — растяжение оболочки по высоте;

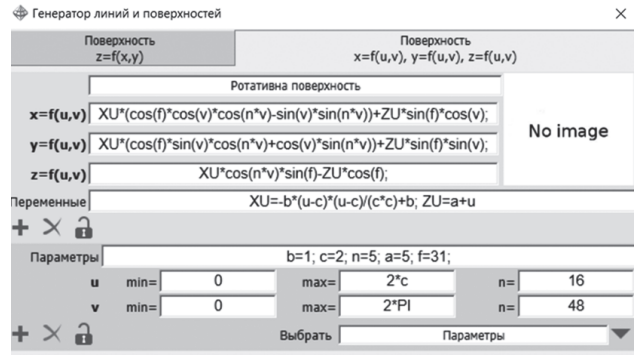
$n$  — количество выпуклых частей поверхности в плоскости  $XY$ ;

$a$  — ширина раскрытия оболочки по верхнему контуру;

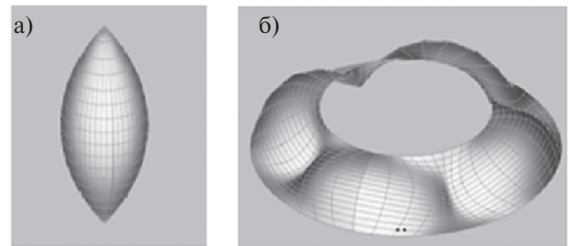
$f$  — отношение углов наклона поверхности к образующей.

Формообразование поверхности с помощью генератора линий и поверхностей в ПК «САПФИР» представлено на рис. 2.

Изменение формообразования поверхности при изменении отношения углов наклона поверхности к образующей показано на рис. 3.

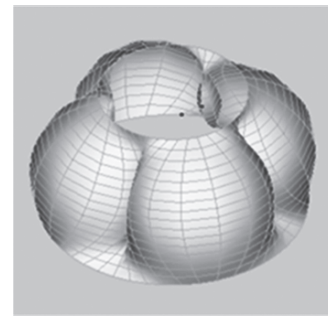


**Рис. 2.** Генератор линий и поверхностей в ПК «САПФИР»



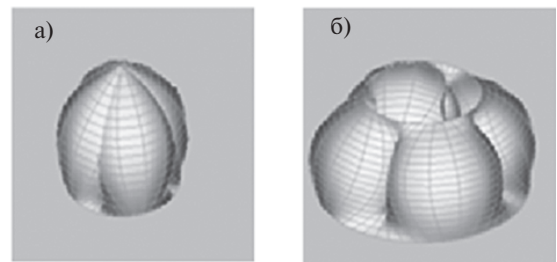
**Рис. 3.** Формообразование по параметру  $f$ : а)  $f = 0$ ; б)  $f = 1$

Методом итераций подобрано оптимальное соотношение углов наклона. Для дальнейшего исследования формообразования принято отношение  $\sin \alpha / \sin \varphi = 31$  (рис. 4).



**Рис. 4.** Формообразование при  $f = 31$

На следующем этапе определена ширина раскрытия оболочки по верхнему контуру (рис. 5). Окончательно принято значение параметра  $a = 5$ .



**Рис. 5.** Формообразование по ширине раскрытия оболочки: а)  $a = 0$ ; б)  $a = 5$

Параметром  $n$  регулируется количество выпуклых частей поверхности в плоскости  $XU$ . Для проектирования объекта параметрической архитектуры принята поверхность с пятью выпуклыми частями (рис. 6).

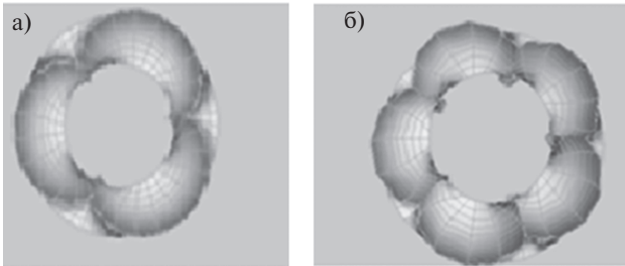


Рис. 6. Варьирование количеством выпуклых частей:  
а)  $n = 3$ ; б)  $n = 5$

В результате получена оболочка диаметром 90 м и высотой 45 м.

Для разработки конструктивной схемы объекта и рационального использования внутреннего пространства оболочки необходимо убрать пазухи, образованные на внутренней поверхности ребер [4; 5]. Оболочка импортирована и доработана в программном комплексе *AutoCAD* (рис. 7).

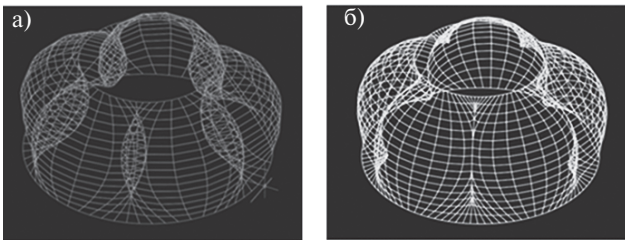


Рис. 7. Оболочка в ПК *AutoCAD*:  
а) до обработки; б) после обработки

Полученные результаты экспортированы в ПК САПФИР и приняты за исходные данные при разработке конструктивных решений (рис. 8).

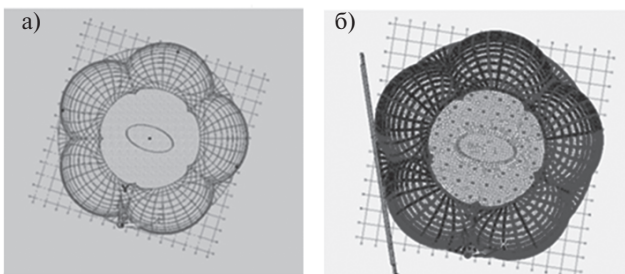


Рис. 8. Поверхность в ПК «САПФИР»:  
а) вариант конструктивных решений; б) расчетная схема

Каркас здания выполнен из монолитных железобетонных колонн и плит перекрытий. Толщина плит перекрытий — 200 мм, колонны диаметром 600 мм на нижних этажах, далее 500 мм с уменьшением до 400 мм. Каркас оболочки включает балки из стальных горячекатаных двутавров № 18.

Конечно-элементная модель разработана в ПК «Лира-САПР» [6]. При создании использованы универсальные пространственные стержни, четыре узловые оболочки и одноузловой конечный элемент с упруго податливой связью (рис. 9).

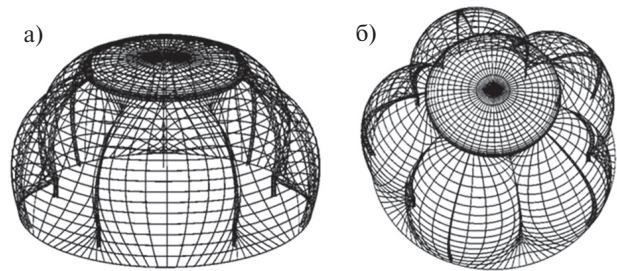


Рис. 9. Конечно-элементная модель каркаса здания:  
а) вид 1; б) вид 2

Для проверки правильности конструктивных решений выполнен динамический расчет каркаса здания [7; 8]. Исследованы частоты и формы свободных колебаний конечно-элементной модели, дающие представление о возможных способах деформирования конструкции (рис. 10). На этапе проектирования модальный анализ позволяет уточнить принятые значения геометрических и физических характеристик каркаса [9].

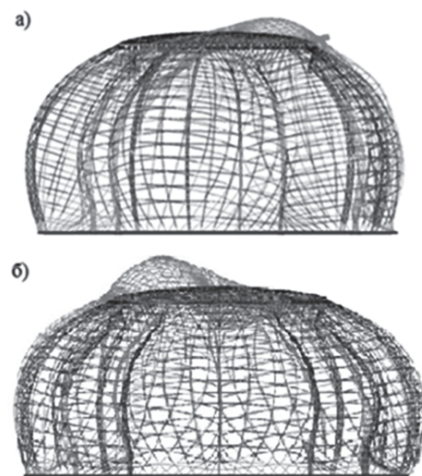


Рис. 10. Формы колебаний каркаса:  
а) 1-я форма; б) 3-я форма



В результате динамического расчета получены главные формы собственных колебаний, частоты и перемещения в узлах. Первая и вторая формы собственных колебаний — поступательные; третья — крутильная; четвертая — изгибно-крутильная. Полученная последовательность характера форм собственных колебаний подтверждает рациональность каркаса сооружения [10].

Итак, исследование эволюции формообразования объекта параметрической архитектуры позволяет выбрать оптимальный вариант аналитической ротативной поверхности для проектирования уникального сооружения. Моделирование объектов параметрической архитектуры методом конечных элементов приводит к созданию каркаса сооружения, отвечающего требованиям прочности, надежности и экономичности проектных решений.

## Литература

1. Эбелинг В. Физика процессов эволюции [Текст] / В. Эбелинг, А. Энгель, Р. Файстель; пер. с нем. Ю.А. Данилова. — М.: Эдиториал УРСС, 2001. — 328 с.
2. Стессель С.А. Заимствование природных принципов формообразования в параметрической архитектуре [Текст] / С.А. Стессель // Вектор науки ТГУ. — 2015. — № 2. — С. 52–57.
3. Кривошапко С.Н. Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчету на прочность тонких оболочек [Текст] / С.Н. Кривошапко, В.Н. Иванов, С.М. Халаби. — М.: Наука, 2006. — 544 с.
4. Кравченко Г.М. Применение параметрического проектирования при моделировании методом конечных элементов [Текст] / Г.М. Кравченко, А.Ю. Манойленко, В.В. Литовка // Инженерный вестник Дона. — 2019. — № 3.
5. Кравченко Г.М. Информационное моделирование объекта параметрической архитектуры [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, В.Г. Кочура // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия «Технические науки». — 2019. — № 1. — С. 17–22.
6. Агаханов Э.К. О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела [Текст] / Э.К. Агаханов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2013. — № 2. — С. 39–45.
7. Агаханов Э.К. Регулирование параметров собственных колебаний пространственного каркаса здания [Текст] / Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2016. — № 3. — С. 8–15.
8. Агаханов Э.К. Расчет зданий сложной геометрической формы на ветровые воздействия [Текст] / Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, Е.В. Осадчий, Е.В. Труфанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2017. — № 2. — С. 8–17.
9. Савостьянов В.Н. Об эквивалентности воздействий в статической задаче механики деформируемого твердого тела [Текст] / В.Н. Савостьянов, Э.К. Агаханов // Изв. вузов. Строительство. — 1995. — № 10. — С. 26–30.
10. Кравченко Г.М. Исследование динамических характеристик каркаса здания методом конечных элементов [Текст] / Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, Д.И. Тронин, А.Е. Гунба // Строительство и архитектура. — 2019. — Т. 7. — № 1. — С. 39–44.

## References

1. Ebeling V., Engel' A., Fajstel' R. *Fizika processov evolyucii* [Physics of Evolution Processes]. Moscow: Editorial URSS Publ., 2001. 328 p.
2. Stessel' S.A. *Zaimstvovanie prirodnyh principov formoobrazovaniya v parametricheskoj arhitekture* [Borrowing of natural principles of morphogenesis in parametric architecture]. *Vektor nauki TGU* [Vector of science of TSU]. 2015, I. 2, pp. 52–57.
3. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N., Halabi S.M. *Analiticheskie poverhnosti: materialy po geometrii 500 poverhnostej i informacija k raschetu na prochnost' tonkih obolochek* [Analytical surfaces: materials on the geometry of 500 surfaces and information on strength calculations of thin shells]. Moscow: Nauka Publ. 2006. 544 p.
4. Kravchenko G.M., Manojlenko A.Yu., Litovka V.V. *Primenenie parametricheskogo proektirovaniya pri modelirovanii metodom konechnykh elementov* [The use of parametric design for modeling by the finite element method]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2019, I. 3.
5. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Kochura V.G. *Informacionnoe modelirovanie ob'ekta parametricheskoj arhitekтуры* [Information modeling of the parametric architecture object]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Engineering]. 2019, I. 1, pp. 17–22.
6. Agahanov E.K. *O razvitii kompleksnyh metodov resheniya zadach mekhaniki deformiruемого tverdogo tela* [On the development of complex methods for solving problems of mechanics of a deformable solid]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2013, I. 2, pp. 39–45.
7. Agahanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. *Regulirovanie parametrov sobstvennykh kolebanij prostranstvennogo karkasa zdaniya* [Regulation of parameters of natural oscillations of the spatial frame of the building]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2016, I. 3, pp. 8–15.
8. Agahanov E.K., Kravchenko G.M., Osadchij E.V., Trufanova E.V. *Raschet zdaniy slozhnoj geometricheskoy formy na vetro-*

- vye vozdejstviya [Calculation of buildings of complex geometric shape for wind effects]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2017, I. 2, pp. 8–17.
9. Savost'yanov V.N., Agahanov E.K. Ob ekvivalentnosti vozdejstvij v staticheskoj zadache mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela [On the equivalence of effects in the static problem of the mechanics of a deformable solid]. *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo* [News of universities. Building]. 1995, I. 10, pp. 26–30.
10. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Tronin D.I., Gunba A.E. Issledovanie dinamicheskikh harakteristik karkasa zdaniya metodom konechnyh elementov [The study of the dynamic characteristics of the frame of the building by the method of finite elements]. *Stroitel'stvo i arhitektura* [Construction and architecture]. 2019, V. 7, I. 1, pp. 39–44