

УДК 624.04

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ
КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЯ СЛОЖНОЙ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ***Кравченко Г. М., Труфанова Е. В.,
Данилейко И. Ю., Думбай В. А.*

Донской государственный технический
университет, Ростов-на-Дону, Российская
Федерация

galina.907@mail.ruEL.Trufanova@mail.ruinna96box@mail.ruvad9477@gmail.com

Рассмотрены принципы параметрического моделирования и проектирования зданий спиралевидной циклической формы с окружностями переменного радиуса в плоскостях пучка. Исследована эволюция формообразования объекта параметрической архитектуры с варьированием параметров функции поверхности. Выполнен анализ формообразования аналитической поверхности. Выбран оптимальный вариант для проектирования уникальных высотных зданий и сооружений. Разработанная конечноэлементная модель по пространственной плитно-стержневой схеме позволяет исследовать динамические характеристики высотного здания.

Ключевые слова параметрическая архитектура, поверхность «Ракушка без вершины», формообразование объекта, уникальное здание, динамические характеристики.

Введение. Развитие инновационных технологий и информационных систем ориентировано на создание нового направления в зодчестве — параметрической архитектуры. Применение аналитических поверхностей в строительстве ограничено сферическими, цилиндрическими, пологими оболочками и оболочками вращения. Математики разработали множество геометрических форм, которые пока не используются в практике проектирования [1].

Работа со специальными программными комплексами (ПК) предполагает различные способы задания поверхностей, создания архитектурного образа объекта, переноса его в расчетный комплекс для формирования конечноэлементной модели и определения напряженно-деформированного состояния несущих конструкций [2]. Метод конечных элементов позволяет исследовать прочностные и динамические характеристики уникальных зданий и сооружений сложной геометрической формы. При моделировании каркаса по плитно-стержневой схеме в пространственной постановке возникает проблема задачи большой размерности. Применение типовых обо-

UDC 624.04

**ANALYSIS OF NORMAL VIBRATIONS OF
THE BUILDING WITH COMPLEX
PARAMETRIC FORM***Kravchenko G. M., Trufanova E. V.,
Danileyko I. Yu., Dumbay V. A.*

Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russian Federation

galina.907@mail.ruEL.Trufanova@mail.ruinna96box@mail.ruvad9477@gmail.com

The paper considers the principles of parametric modeling and design based on the example of buildings, the architectural image of which is a set of spiral circular surface with circles of variable radius. The article studies the formation evolution of parametric architecture objects with variation of surface function parameters. The analysis of the analytical surface formation is carried out and the optimal variant for the design of unique buildings is chosen. The authors have developed the finite element model based on the spatial plate-bar scheme to research the dynamic characteristics of the building.

Keywords: parametric architecture, surface «Shell without top», shape of the object, unique building, dynamic characteristics.

лочечных конечных элементов для объектов параметрической архитектуры с криволинейными поверхностями требует сгущения сетки, что также увеличивает порядок разрешающих уравнений.

В данной работе предлагается:

- исследовать эволюцию формообразования объекта параметрической архитектуры;
- выполнить анализ формообразования поверхности;
- выбрать оптимальный вариант для применения объекта при проектировании высотных зданий и сооружений [3].

Формообразование объекта параметрической архитектуры. Исследование принципов формообразования выполнено в ПК «Сапфир». Комплекс обладает встроенной функцией задания линии спиралевидной циклической поверхности с окружностями переменного радиуса в плоскостях пучка «Ракушка без вершины».

Для задания поверхности исследуемого объекта параметрической архитектуры рассмотрены варианты поверхностей с разными параметрами. Чтобы получить форму винтовой поверхности, необходимо выбрать поверхность «Ракушка без вершины» (рис. 1).

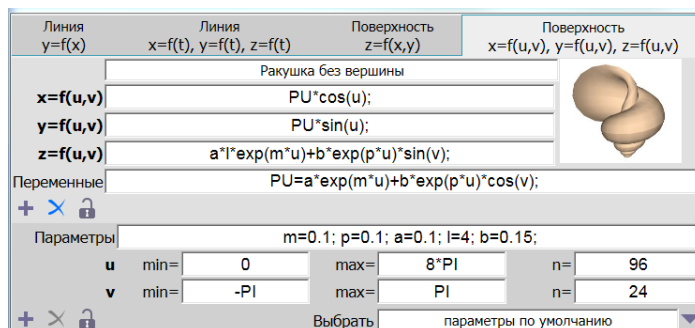


Рис. 1. Задание поверхности «Ракушка без вершины» в ПК «Сапфир»

Исследуемая поверхность задается уравнениями [4]:

$$\begin{aligned}
 x &= x(u, v) = PU \cdot \cos(u), \\
 y &= y(u, v) = PU \cdot \sin(u), \\
 z &= z(v) = a \cdot l \cdot e^{mu} + b \cdot e^{pu} \cdot \sin(v), \\
 PU &= a \cdot e^{mu} + b \cdot e^{pu} \cdot \cos(v).
 \end{aligned}$$

Объект архитектуры представляет собой здание высотой 130 м. Параметры поверхности варьировались с учетом требований к геометрическим размерам здания и отсутствия зазоров между витками по высоте.

На первом этапе параметр m изменялся от $-0,1$ до $0,1$ (рис. 2).

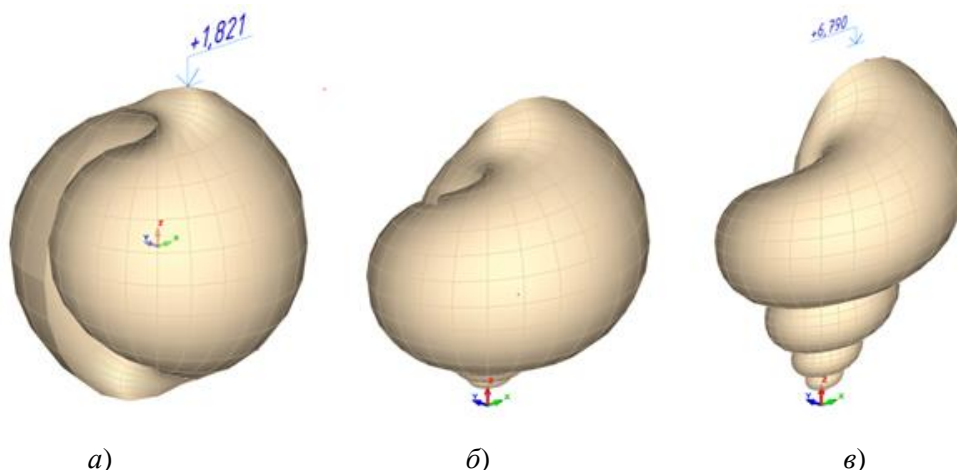


Рис. 2. Варьирование параметра m : $m = -0,1$ (а); $m = 0,08$ (б); $m = 0,1$ (в)

Высота объекта и положение его относительно центра координат менялись за счет увеличения витков ракушки. Использование поверхности в качестве объекта параметрической архитектуры возможно со значением параметра $m = 0,08$.

Параметр p влияет на радиус винтовой образующей, при этом меняется высотная отметка объекта. Анализ эволюции формообразования позволяет сделать вывод об использовании поверхности в качестве объекта параметрической архитектуры с параметром $p = 0,0804$.

Изменение параметра a в пределах $-1,0 \div 1,0$ дает принципиально различные поверхности, представленные на рис. 3. Знак данного параметра определяет направление «раскручивания» ракушки. С увеличением параметра по модулю увеличиваются высота и радиус. Для конечного объекта принят параметр $a = 1,0$.

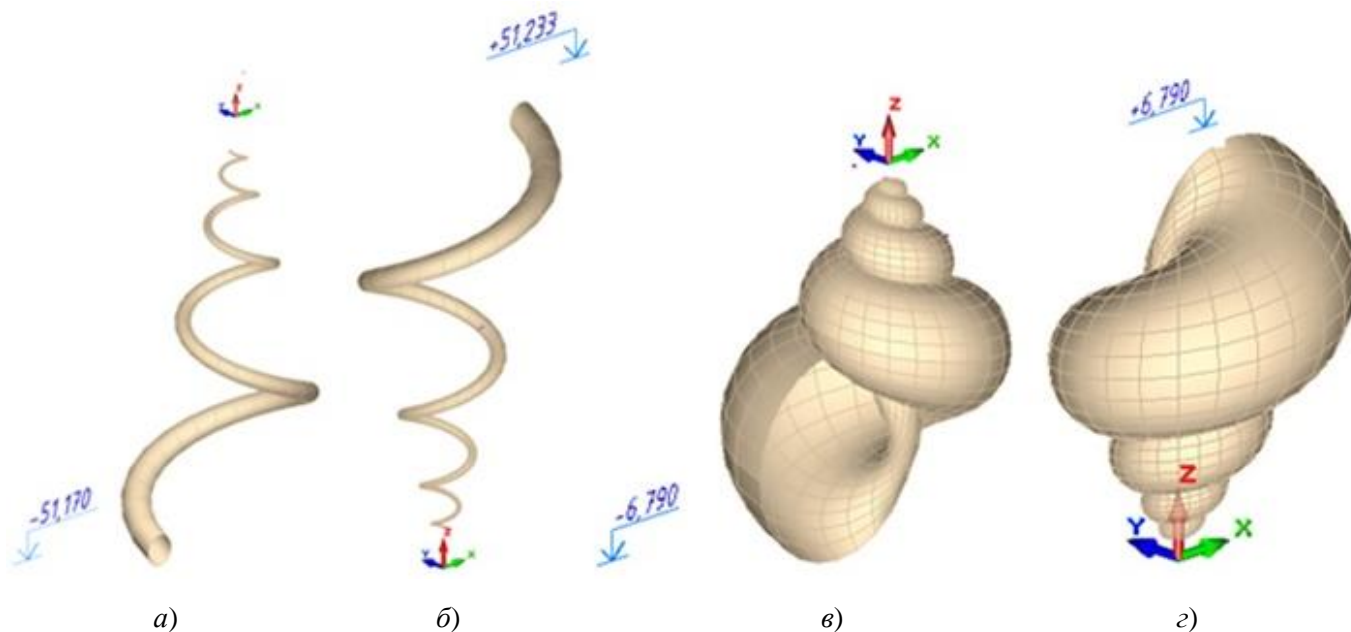


Рис. 3. Варьирование параметра a : $a = -1,0$ (а); $a = 1,0$ (б); $a = -0,1$ (в); $a = 0,1$ (г)

«Раскручивание» ракушки зависит от параметра l , а положение объекта в системе координат — от его знака (рис. 4).

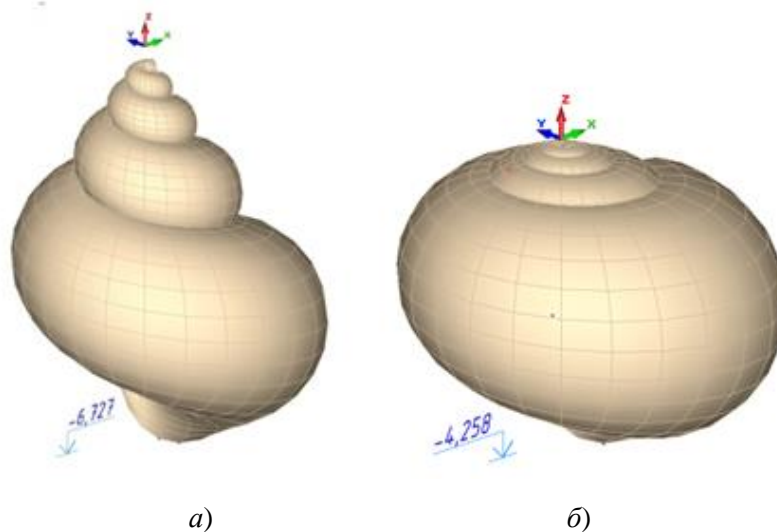


Рис. 4. Варьирование параметра l : $l = -4,0$ (а); $l = -2,0$ (б)

Проанализировав эволюцию формы объекта, можно сделать вывод об использовании поверхности с параметром $l = -4,0$.

Угловой параметр u исследован с шагом π . Рис. 5 четко отображает зависимость между параметром u и числом витков объекта.

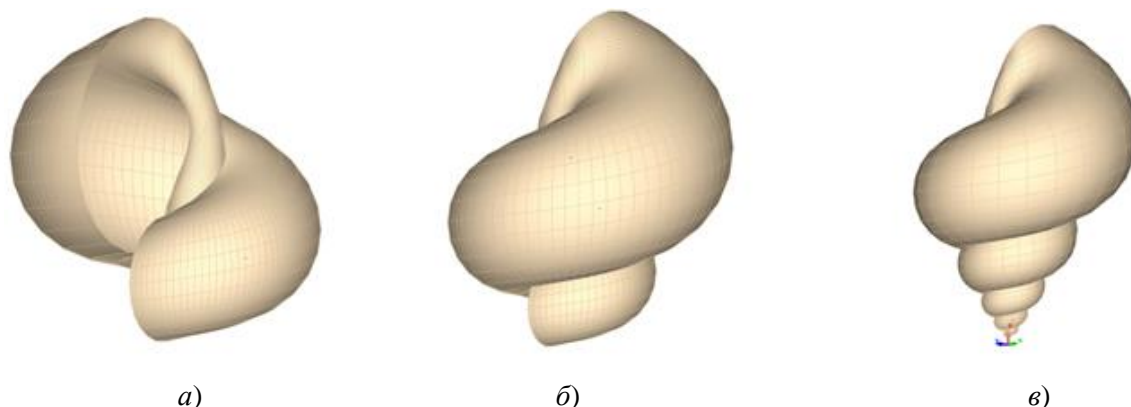


Рис. 5. Варьирование параметра u : $u_{min} = -\pi$, $u_{max} = \pi$ (а); $u_{min} = -\pi$, $u_{max} = 2 \times \pi$ (б); $u_{min} = 0$; $u_{max} = 8 \times \pi$ (в)

Для высотного здания принимаем значение $u_{min} = 0$, $u_{max} = 14 \times \pi$.

Параметр v — это угловой параметр, меняющийся с шагом π . Он влияет на структуру поверхности и окружности переменного радиуса в плоскостях пучка.

Итак, для преобразования ракушки в спиралевидную винтовую поверхность, необходимую для проектирования высотного здания, приняты параметры функции «Ракушка без вершины»: $m = 0,08$; $p = 0,0804$; $a = -1,0$; $l = -4,0$; $b = 1,0$; $u_{min} = 0$, $u_{max} = 14\pi$.

Результат параметрического моделирования объекта в ПК «Сапфир» представлен на рис. 6 а.

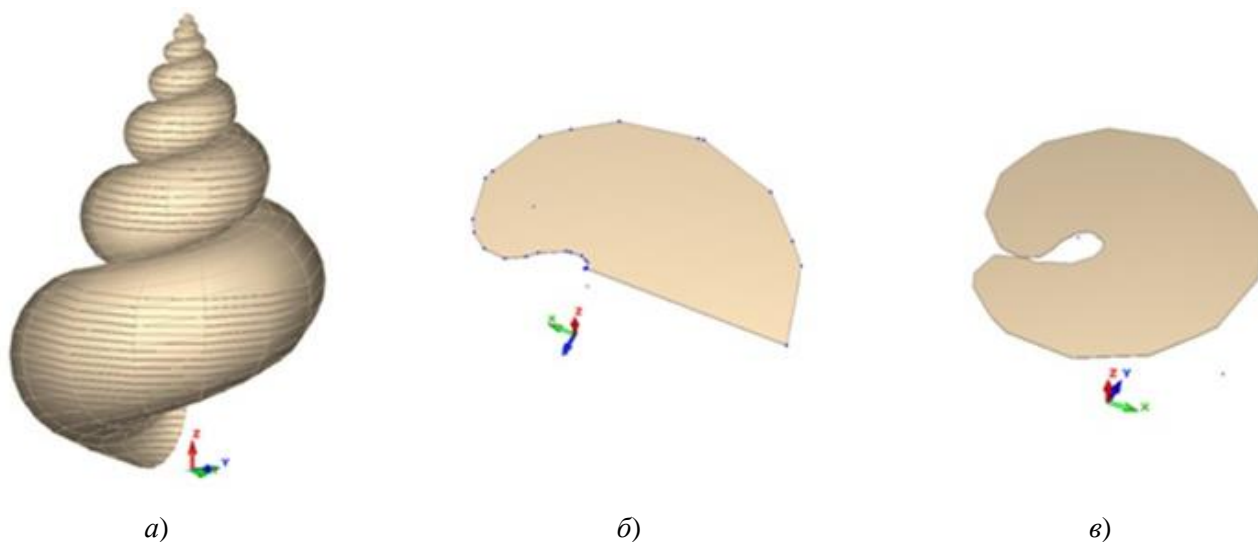


Рис. 6. Результат параметрического моделирования: общий вид (а); плита перекрытия вариант 1 (б); плита перекрытия вариант 2 (в)

Полученная форма объекта высотой 130 м может использоваться для проектирования уникального здания многофункционального назначения. Внутри круговых поверхностей расположен каркас здания, представляющий собой ребристые плиты перекрытия различных очертаний, опирающиеся на колонны (рис. 6 б, в). Поскольку винтовые поверхности с увеличением высоты меняют свое очертание в плане, то расчетная схема каждого следующего этажа будет

отличной от предыдущей. Плиты перекрытия закручиваются по спирали вокруг ядра, одновременно поднимаясь от уровня первого этажа до отметки 130 метров.

Динамические характеристики объекта параметрической архитектуры. Модель здания с поверхностью «Ракушка без вершины» разработана в ПК «Сапфир» с разбивкой на конечные элементы и триангуляцией расчетной модели, которая экспортирована в ПК «Лира» (рис. 7 а, б) [5, 6].

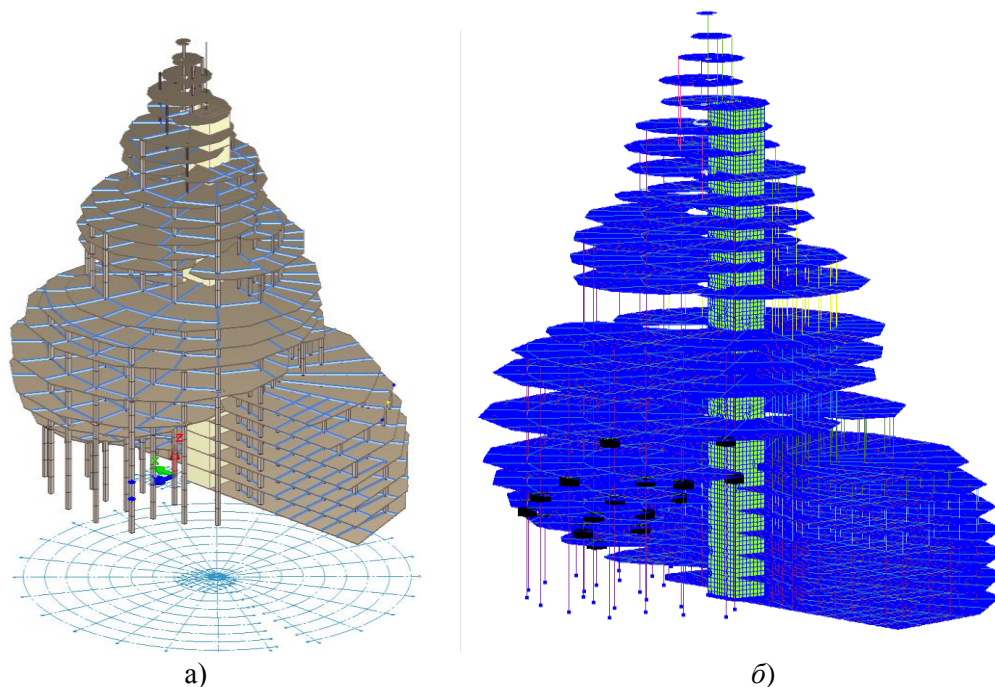


Рис. 7. Моделирование объекта: общий вид в ПК «Сапфир»(а); расчетная схема в ПК «Лира» (б)

Расчетная модель откорректирована, закрепление колонн и ядро жесткости выполнены жесткими во всех направлениях. Для модального анализа сформирована матрица масс на основе собственного веса всех элементов каркаса. Модальный анализ выполнен по 20 основным формам колебаний (рис. 8).

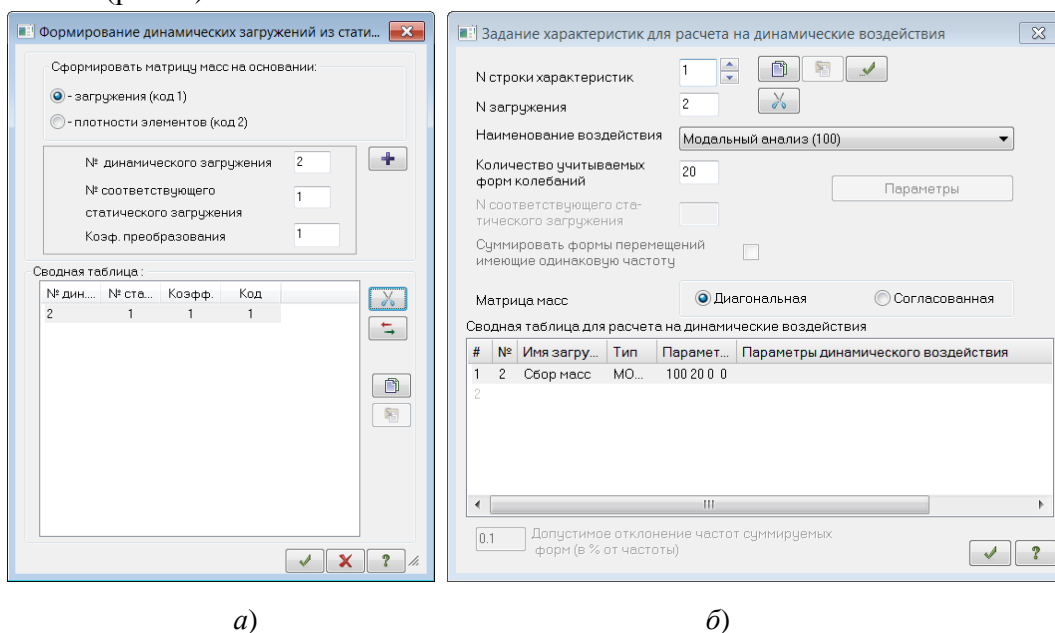


Рис. 8. Модальный анализ формирования матрицы масс (а); задание характеристик для расчета (б)

В таблице представлены динамические характеристики объекта параметрической архитектуры.

Таблица

Динамические характеристики здания параметрической архитектуры

№ п/п	Собственные значения	Частоты		Периоды, с	Коэффициент распределения	Модальная масса, %	
		Рад/с	Гц				
1	0,30	3,35	0,53	1,88	43,31	19,45	19,45
2	0,27	3,65	0,58	1,72	-34,07	12,04	31,49
3	0,19	5,19	0,83	1,21	8,53	0,76	32,25
4	0,09	10,83	1,72	0,58	19,16	3,81	36,06
5	0,09	11,40	1,81	0,55	23,76	5,86	41,91
6	0,08	12,26	1,95	0,51	-17,70	3,25	45,16
7	0,08	12,55	2,00	0,50	4,00	0,17	45,33
8	0,08	12,58	2,00	0,50	-4,69	0,23	45,56
9	0,08	12,65	2,01	0,50	0,82	0,01	45,56
10	0,08	12,95	2,06	0,48	-17,30	3,10	48,67
11	0,06	17,70	2,82	0,35	-0,03	0,00	48,67
12	0,05	18,68	2,97	0,34	-6,33	0,42	49,08
13	0,05	18,98	3,02	0,33	4,37	0,20	49,28
14	0,05	19,42	3,09	0,32	-1,16	0,01	49,29
15	0,05	19,62	3,12	0,32	-4,59	0,22	49,51
16	0,05	20,24	3,22	0,31	0,78	0,01	49,52
17	0,05	20,75	3,30	0,30	6,35	0,42	49,94
18	0,05	21,27	3,39	0,30	3,31	0,11	50,05
19	0,05	21,34	3,40	0,29	-1,32	0,02	50,07
20	0,05	21,79	3,47	0,29	2,02	0,04	50,11
21	0,05	21,81	3,47	0,29	-1,03	0,01	50,12
22	0,05	22,04	3,51	0,28	-0,98	0,01	50,13
23	0,04	22,39	3,57	0,28	-0,71	0,01	50,14

Анализ результатов показал, что полученные формы колебаний содержат 50% модальной массы, 19% из которых относятся к первой форме. Формы колебаний (поступательные, изгибные и крутильные) стабилизируются после 20-й нормальной формы.

Заключение. Исследована эволюция формообразования объекта параметрической архитектуры. На основе полученных результатов выбраны оптимальные параметры аналитической спиралевидной циклической поверхности с окружностями переменного радиуса в плоскостях пучка «Ракушка без вершины». Полученная аналитическая поверхность используется для проектирования уникального здания многофункционального назначения высотой 130 м в г. Севастополь. Разработанная конечноэлементная модель по пространственной плитно-стержневой схеме позволяет исследовать динамические характеристики высотного здания. Полученный спектр частот собственных колебаний и их формы подтверждают правильность конструктивных решений каркаса здания. Первая форма колебаний — поступательная, последующие — изгибные и крутильные, что соответствует нормам проектирования.

Развитие параметрической архитектуры вызывает необходимость создания новых подходов к расчету уникальных зданий и сооружений [7]. Информационное моделирование таких объектов будет способствовать соответствующим изменениям городской застройки [8–11].

Библиографический список

1. Исследование принципов формообразования объектов параметрической архитектуры [Электронный ресурс] / Г. М. Кравченко [и др.] // Инженерный вестник Дона. — 2019. — № 1. — Режим доступа : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5513 (дата обращения : 03.12.19).
2. Кравченко, Г. М. Моделирование фракталов [Электронный ресурс] / Г. М. Кравченко, С. Э. Васильев, Л. И. Пуданова // Инженерный вестник Дона. — 2016. — № 4. — Режим доступа : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3930 (дата обращения : 03.12.19).
3. Поморов, С. Б. Терминология нелинейной архитектуры и аспекты ее применения / С. Б. Поморов, Исмаил Халед Д. Альдин // Вестник ТГАСУ. — 2014. — № 3. — С. 78–87.
4. Кривошапко, С. Н. Аналитические поверхности : материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчету на прочность тонких оболочек / С. Н. Кривошапко, В. Н. Иванов, С. М. Халаби. — Москва : Наука, 2006. — 544 с.
5. Кравченко, Г. М. Применение параметрического проектирования при моделировании методом конечных элементов [Электронный ресурс] / Г. М. Кравченко, А. Ю. Манойленко, В. В. Литовка // Инженерный вестник Дона. — 2019. — № 3. — Режим доступа : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5051 (дата обращения : 03.12.19).
6. Кравченко, Г. М. Параметрическая архитектура [Электронный ресурс] / Г. М. Кравченко, А. Ю. Манойленко, В. В. Литовка // Инженерный вестник Дона. — 2018. — № 2. — Режим доступа : ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2019/5040 (дата обращения : 03.12.19).
7. Архитектура / Т. Г. Маклакова [и др.]. — 3-е изд., стереотип. — Москва : АСВ, 2019. — 472 с.
8. Barrallo, J. The Geometry of Organic Architecture [Электронный ресурс] / J. Barrallo, S. Sánchez-Beitia // Bridges 2011 : Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture. — Режим доступа : <https://archive.bridgesmathart.org/2011/bridges2011-65.pdf> (дата обращения : 03.12.19).
9. Стессель, С. А. Заимствование природных принципов формообразования в параметрической архитектуре / С. А. Стессель // Вектор науки ТГУ. — 2015. — № 2. — С. 52–57.
10. Иванов, В. Н. Геометрия и конструирование трубчатых оболочек / В. Н. Иванов // Вестник Российского университета дружбы народов. — 2005. — № 1. — С. 109–114.
11. Шумейко, В. И. Об особенностях проектирования уникальных, большепролетных и высотных зданий и сооружений [Электронный ресурс] / В. И. Шумейко, О. А. Кудинов // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 4. — Режим доступа : <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2164> (дата обращения : 03.12.19).