

РАСЧЕТ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК ANALYSIS OF THIN SHELLS

DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-5-510–519
УДК 69:624.074:624.012.4
EDN: INGGHL

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Оболочки в форме алгебраических линейчатых поверхностей на ромбическом плане

Е.М. Тупикова  

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
 emelian-off@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 29 февраля 2023 г.
Доработана: 14 мая 2023 г.
Принята к публикации: 22 мая 2023 г.

Заявление о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Одними из перспективных к внедрению в архитектурной и строительной практике объектов являются аналитически заданные формы конструкций в виде тонких упругих оболочек со срединной поверхностью в форме алгебраических линейчатых поверхностей на ромбическом плане на основе различных кривых. В частности, в данной работе рассматриваются три поверхности, имеющие одинаковые образующие линии каркаса из суперэллипсов с использованием каркасных кривых, имеющих вид ватерлинии, мидельшпангоута, килевой линии – линий, которые изначально были получены и применяются в судостроении. Рассмотрены формы сооружений на ромбовидном плане. В статье произведено геометрическое моделирование данных объектов, построение конечно-элементных моделей и их расчет. Проведено сравнение величин, характеризующих напряженно-деформированное состояние для трех разных форм с одинаковым пролетом и стрелой подъема (вариантное проектирование с оптимальным выбором). С точки зрения теории представляется интересным результатом возможность построения трех разных поверхностей на одинаковом каркасе. С точки зрения прочностного анализа из трех полученных оболочек выбрана та, у которой наиболее равномерное распределение напряжений, как наиболее экономичная по затратам материала.

Ключевые слова: тонкая упругая оболочка, статический расчет, суперэллипс, метод конечного элемента

Для цитирования

Тупикова Е.М. Оболочки в форме алгебраических линейчатых поверхностей на ромбическом плане // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 5. С. 510–519. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-5-510-519>

Тупикова Евгения Михайловна, кандидат технических наук, доцент департамента строительства, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8742-3521; E-mail: emelian-off@yandex.ru

© Тупикова Е.М., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Shells in the form of algebraic ruled surfaces on a rhombic base

Evgenia M. Tupikova  

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ emelian-off@yandex.ru

Article history

Received: February 29, 2023

Revised: May 14, 2023

Accepted: May 22, 2023

Conflicts of interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Abstract. One of the promising objects for application in architectural and construction practice are analytically determined structural shapes in the form of thin elastic shells with a median surface in the form of algebraic ruled surfaces on a rhombic plan on the basis of various curves. In particular, this study considers three surfaces with identical framework forming lines of superellipses using framework curves that have the appearance of waterline, midships section, and main buttock lines — lines that have been initially generated and used in shipbuilding. The shapes of structures on a rhombic base were considered. The study contains geometric modeling of such structures, creation of finite element models and their computation. A comparison of the values characterizing the stress-strain state for three different shapes with the same span and lifting arm (variant designing with optimized choice) has been carried out. From the theoretical point of view, the possibility of generating three different surfaces on the same frame seems to be an interesting result. From the viewpoint of strength analysis, one of the three obtained shells was chosen as it has the most uniform stress distribution, which is the most economical in terms of material cost.

Keywords: thin elastic shell, static structural analysis, superellipse, finite element method

For citation

Tupikova E.M. Shells in the form of algebraic ruled surfaces on a rhombic base. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(5):510–519. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-5-510-519>

1. Введение

В настоящее время в связи с появлением новых материалов и технологий в строительстве стало возможно более широкое внедрение новых форм, в частности, в виде аналитических поверхностей. С появлением 3D-принтеров, различных добавок для бетонов с заданными характеристиками, существующими возможностями торкретирования, усовершенствования технологии тентовых сооружений многие архитекторы и проектировщики усиленно развивают тему поиска новых геометрических форм для решения как утилитарных, так и эстетических задач, с тем чтобы отобрать наиболее удачные оптимальные конфигурации сооружений для применения на практике. Получив уравнение новой поверхности, представляется интересным провести прочностной расчет для предварительного проектирования и анализа работы такой конструкции под нагрузкой. В [1] предложены для внедрения пять типов линейчатых алгебраических поверхностей с главным каркасом из трех суперэллипсов.

Суперэллипс представляет собой замкнутую кривую, состоящую из четырех дуг, симметричную относительно большой и малой полуосей [2]. Дуги могут быть выпуклыми или вогнутыми. Суперэллипс находится внутри прямоугольника. Явные и параметрические уравнения алгебраических поверхностей общего вида с главным каркасом из трех суперэллипсов получены в [3–5]. На основе этих уравнений, как частные случаи, получены линейчатые алгебраические поверхности.

Если задать плоские кривые главного каркаса поверхностей в виде:

➤ кривая 1 (ватерлиния в судостроении) расположена в плоскости $z = 0$:

$$|y|^r = W^r \left(1 - \frac{|x|^t}{L^t}\right), \quad (1)$$

➤ кривая 2 (мидельшпангоут в судостроении) расположена в плоскости $x = 0$:

$$|z|^n = T^n \left(1 - \frac{|y|^m}{W^m}\right), \quad (2)$$

➤ кривая 3 (килевая линия в судостроении) расположена в плоскости $y = 0$:

$$|z|^s = T^s \left(1 - \frac{|x|^k}{L^k}\right), \quad (3)$$

где для выпуклых кривых $r, t, n, m, s, k > 1$; для вогнутых кривых $r, t, n, m, s, k < 1$, то явные уравнения тройки алгебраических поверхностей с заданным каркасом (1)–(3) будут иметь вид [3]:
с образующим семейством сечений $x = \text{const}$:

$$|z| = T(1 - |x|^k/L^k)^{1/s} [1 - |y/W|^m / (1 - |x/L|^t)^{m/r}]^{1/n}, \quad (4)$$

с образующим семейством сечений $y = \text{const}$:

$$|z| = T(1 - |y|^m/W^m)^{1/n} [1 - |x/L|^k / (1 - |y/W|^r)^{k/t}]^{1/s}, \quad (5)$$

и с образующим семейством сечений $z = \text{const}$:

$$|y| = W(1 - |z|^n/T^n)^{1/m} [1 - |x/L|^t / (1 - |z/T|^s)^{t/k}]^{1/r}, \quad (6)$$

где $-L \leq x \leq L, -W \leq y \leq W, 0 \leq z \leq T$.

Явные уравнения поверхностей (4)–(6) можно перевести в параметрическую форму задания:

$$x = x(u) = \pm uL, \quad y = y(u, v) = vW[1 - u^t]^{1/r}, \quad z = z(u, v) = T[1 - u^k]^{1/s} [1 - |v|^m]^{1/n}, \quad (4a)$$

$$x = x(u, v) = vL[1 - u^r]^{1/t}, \quad y = y(u) = \pm uW, \quad z = z(u) = T[1 - u^m]^{1/n} [1 - |v|^k]^{1/s}, \quad (5a)$$

$$x = x(u, v) = vL[1 - u^s]^{1/k}, \quad y = y(u, v) = \pm W[1 - u^n]^{1/m} [1 - |v|^t]^{1/r}, \quad z = z(u) = uT, \quad (6a)$$

где $0 \leq u \leq 1, -1 \leq v \leq 1$; u, v — безразмерные параметры.

Если принять $r = t = 1, n = m = 1, s = k = 1$, то кривые (1)–(3) вырождаются в прямые линии, объединенные в ромб.

2. Метод

2.1. Цель исследования. Учитывая активное внедрение новых форм оболочечных структур [6; 7] в рамках современных архитектурных стилей оболочек (параметрическая [8], дигитальная [9], нелинейная [10] архитектура, архитектура многогранников [11], архитектура свободных форм и др.), появление новых поверхностей, пригодных для строительных большепролетных структур, приветствуется архитекторами [12]. В настоящей статье изучается возможность использования линейчатых алгебраических поверхностей с каркасом из двух ромбов и одной произвольной плоской кривой в архитектуре строительных оболочек. Дается информация о статическом расчете на прочность тонких оболочек в форме рассматриваемых линейчатых поверхностей.

2.2. Геометрические исследования поверхности для случая вырождения суперэллипсов (1) и (2) в ромбы. Рассмотрим линейчатые поверхности как частный случай поверхностей (4a)–(6a). Пусть суперэллипс (1) вырождается в ромб, то есть $r = t = 1$, суперэллипс (2) вырождается в прямые линии, то есть $n = m = 1$, а кривая (3) остается без изменений (рис. 1), тогда имеем три поверхности на плоском ромбическом плане:

$$z = T(1 - |x|^k/L^k)^{1/s} [1 - |y/W| / (1 - |x/L|)], \quad (7)$$

$$z = T(1 - |y|/W) [1 - |x/L|^k / (1 - |y/W|)^k]^{1/s}, \quad (8)$$

$$|y| = W(1 - z/T) [1 - |x/L| / (1 - z^s/T^s)^{1/k}], \quad (9)$$

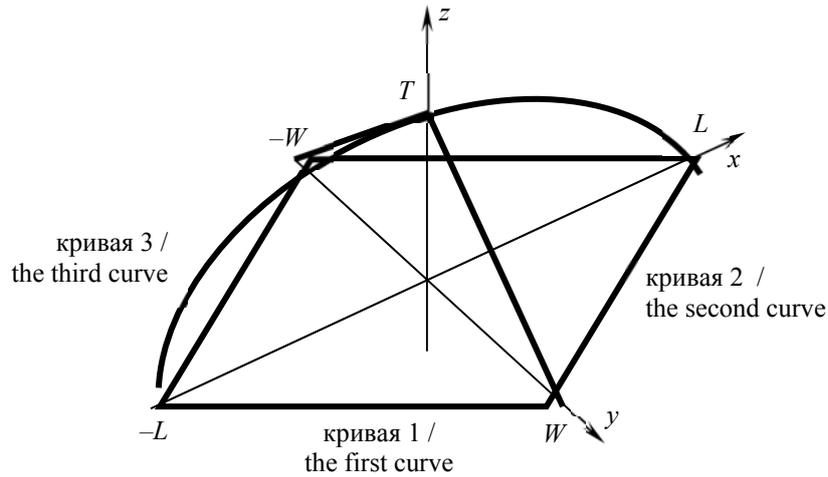


Рис. 1. Каркас рассматриваемых поверхностей
Figure 1. The frame of the considered surfaces

Явные уравнения поверхностей (7)–(9) можно перевести в параметрическую форму задания:

$$x = x(u) = \pm uL, y = y(u, v) = vW[1 - u], z = z(u, v) = T[1 - u^k]^{1/s}[1 - |v|] \quad (\text{рис. 2, } a), \quad (7a)$$

$$x = x(u, v) = vL[1 - u], y = y(u) = \pm uW, z = z(u) = T[1 - u][1 - |v|^k]^{1/s} \quad (\text{рис. 2, } б), \quad (8a)$$

$$x = x(u, v) = vL[1 - u^s]^{1/k}, y = y(u, v) = \pm W[1 - u][1 - |v|], z = z(u) = uT \quad (\text{рис. 2, } в). \quad (9a)$$

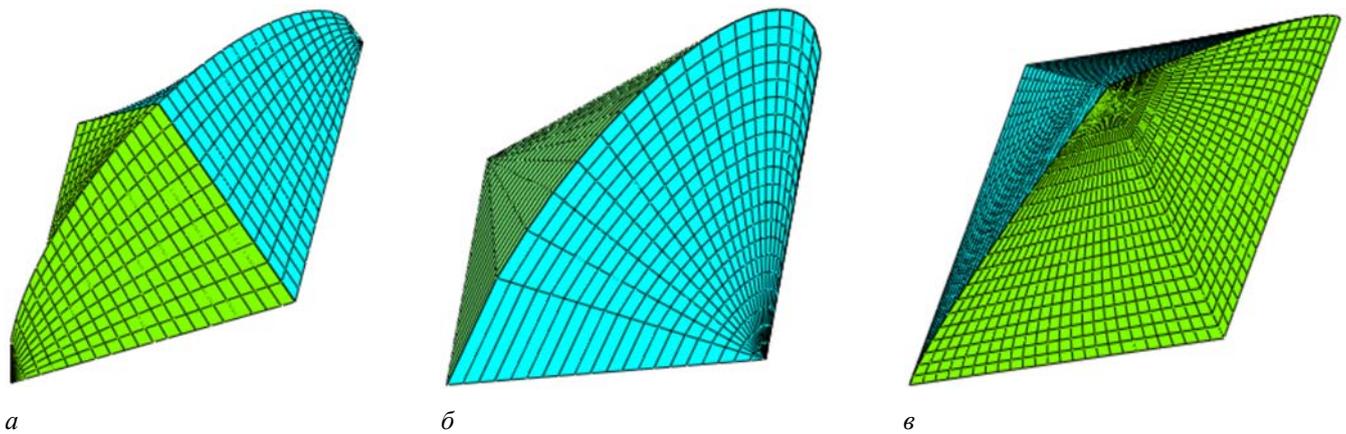


Рис. 2. Поверхности на плоском ромбическом плане:
 а — по уравнению 7а; б — по уравнению 7б; в — по уравнению 7в [1]

Figure 2. Surfaces on a plane rhombic base:
 а — according to equation 7a; б — according to equation 7b; в — according to equation 7в [1]

При построении поверхностей, показанных на рис. 2, предполагалось, что длина поверхности вдоль оси Ox $2L = 12$ м, ее ширина вдоль оси Oy $2W = 10$ м и высота $T = 5$ м. Все поверхности имеют $s = k = 2$. Следовательно, килевая линия является полуэллипсом.

Определим порядок алгебраических уравнений (7)–(9) при $s = k = 2$, для чего запишем эти уравнения в виде

$$\frac{z^2}{T^2} \left(1 - \frac{|x|}{L}\right) - \left(1 - \frac{x^2}{L^2}\right) \left(1 - \frac{|x|}{L} + 2 \frac{|y|}{W}\right) - \frac{y^2}{W^2} \left(1 + \frac{|x|}{L}\right) = 0, \quad (7б)$$

$$\frac{z^2}{T^2} \left(1 + \frac{|y|}{W}\right) - \left(1 - \frac{|y|}{W}\right)^2 \left(1 + \frac{|y|}{W}\right) + \frac{x^2}{L^2} \left(1 - \frac{|y|}{W}\right) = 0, \quad (86)$$

$$\left(\frac{|y|}{W} - 1 + \frac{z}{T}\right)^2 \left(1 + \frac{z}{T}\right) - \frac{x^2}{L^2} \left(1 - \frac{z}{T}\right) = 0. \quad (96)$$

Теперь очевидно, что поверхности (76)–(96) 3-го порядка (см. рис. 2, *a* — 2, *в*). Но хотя все поверхности одного порядка, описывают эти уравнения разные алгебраические поверхности.

Коэффициенты основных квадратичных форм A^2 , B^2 , F , L , M , N поверхностей (7а)–(9а) будут иметь вид для случая $s = k = 2$:

➤ для поверхности (7а):

$$A^2 = L^2 + v^2 W^2 + T^2(1 - v)^2 u^2 / (1 - u^2), \quad F = T^2(1 - v)u - vW^2(1 - u), \quad B^2 = W^2(1 - u)^2 + T^2(1 - u^2),$$

$$A^2 B^2 - F^2 = L^2 [W^2(1 - u)^2 + T^2(1 - u^2)] + W^2 T^2(1 - u)(v + u)^2 / (1 + u);$$

$$L = \pm T W L [(1 - |v|)(1 - u) / (1 - u^2)^{3/2}] / (A^2 B^2 - F^2)^{1/2},$$

$$M = [\pm L T W (1 - u) / (1 - u^2)^{1/2}] / (A^2 B^2 - F^2)^{1/2}, \quad N = 0;$$

➤ для поверхности (8а):

$$A^2 = v^2 L^2 + W^2 + T^2(1 - v^2), \quad F = (1 - u)v(T^2 - L^2), \quad B^2 = L^2(1 - u)^2 + T^2(1 - u)^2 v^2 / (1 - v^2),$$

$$A^2 B^2 - F^2 = (1 - u)^2 L^2 [W^2 + T^2 / (1 - v^2)],$$

$$L = M = 0, \quad N = \pm W L T (1 - u)^2 / [(A^2 B^2 - F^2)^{1/2} (1 - v^2)^{3/2}],$$

➤ для поверхности (9а):

$$A^2 = T^2 + W^2(1 - |v|)^2 + v^2 L^2 u^2 / (1 - u^2), \quad F = W^2(1 - |v|)(1 - u) - uvL^2, \quad B^2 = L^2(1 - u)^2 + W^2(1 - u)^2,$$

$$L = \pm W T L (1 - u)v / [(A^2 B^2 - F^2)^{1/2} (1 - u^2)^{3/2}],$$

$$M = \pm W T L (u - 1) / [(A^2 B^2 - F^2)^{1/2} (1 - u^2)^{1/2}], \quad N = 0.$$

Следовательно, криволинейные координаты u , v на рассматриваемых поверхностях будут неортогональными ($F \neq 0$) и для поверхностей (7а), (9а) — несопряженными ($M \neq 0$).

Площадь фрагмента или всей срединной поверхности оболочки можно вычислить по формуле

$$S = \iint \sqrt{A^2 B^2 - F^2} \, dudv.$$

Координатные линии v на поверхности, изображенной на рис. 2, *a*, будут совпадать с прямолинейными образующими поверхности ($N = 0$). Координатные линии v на поверхности, изображенной на рис. 2, *в*, тоже совпадают с прямолинейными образующими поверхности ($N = 0$), а координатные линии u на поверхности (8а) (рис. 2, *б*) будут совпадать с прямыми на поверхности.

Гауссова кривизна $K = (LN - M^2) / (A^2 B^2 - F^2)$ поверхности (8а) (рис. 2, *б*) равна нулю, следовательно — это конус. Кроме того, эта поверхность при $T = L$ будет иметь $F = 0$, следовательно, криволинейная координатная сеть u , v на ней будет в линиях кривизн, так как $F = 0$ и $M = 0$. Такое положение возникнет, если килевую линию (3) взять в виде окружности.

Очевидно, что на основе поверхностей, изображенных на рис. 2, *a*, 2, *б* и 2, *в*, легко запроектировать тентовое покрытие, учитывая, что поверхность образована семейством прямых линий [13], а поверхность, представленная на рис. 2, *б*, полностью развертывается на плоскость.

Место рассматриваемых линейчатых поверхностей в классификации линейчатых поверхностей пока не определено [5–14]. Две поверхности, изображенные на рис. 2, *a*, и 2, *в*, можно отнести к коноидам [6–15], а поверхность на рис. 2, *б* — к коническим поверхностям.

На рис. 3 показаны поверхности, задаваемые уравнениями (7а)–(9а), с геометрическими параметрами: $T = L = 6$ м, $W = 3$ м, $s = k = 0,8$.

На рис. 4 показаны поверхности, задаваемые уравнениями (7б)–(9б), с геометрическими параметрами: $L = 6$ м, $W = 6$ м, $T = 8$ м, $s = k = 1,5$.

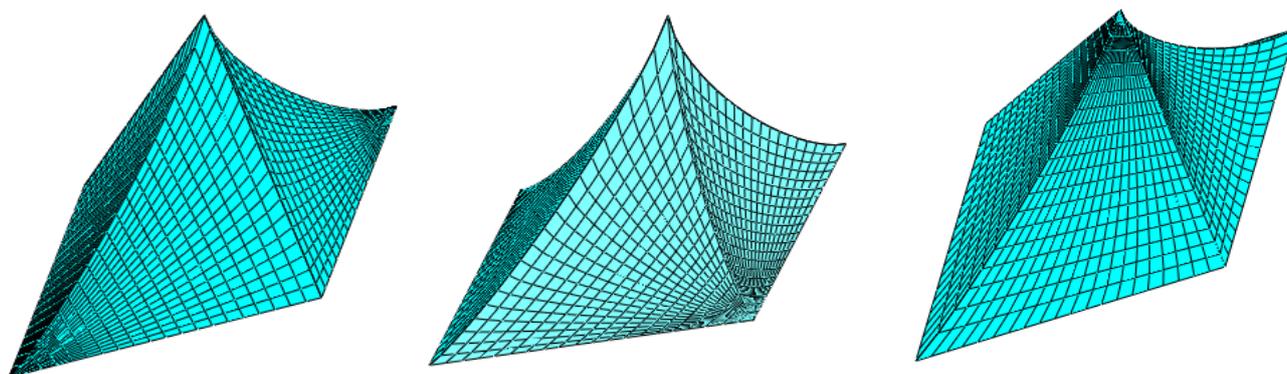


Рис. 3. Поверхности, соответствующие уравнениям (7а)–(9а), с параметрами $T = L = 6$ м, $W = 3$ м, $s = k = 0,8$
Figure 3. Surfaces corresponding to equations (7a)–(9a) with parameters $T = L = 6$ m, $W = 3$ m, $s = k = 0.8$

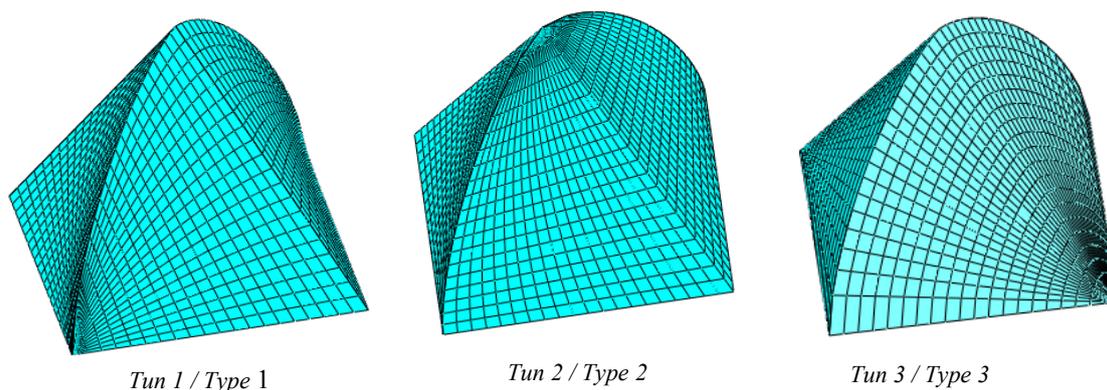


Рис. 4. Поверхности, соответствующие уравнениям (7б)–(9б), с параметрами $L = 6$ м, $W = 6$ м, $T = 8$ м, $s = k = 1,5$
Figure 4. Surfaces corresponding to equations (7b)–(9b), with parameters $L = 6$ m, $W = 6$ m, $T = 8$ m, $s = k = 1.5$

2.3. Статический расчет оболочек со срединными поверхностями (7а)–(9а). Для расчета на собственный вес были выбраны три оболочки, построенные согласно формулам (7а)–(9а), с геометрическими параметрами $T = L = 6$ м, $W = 3$ м, $s = k = 1,5$ (см. рис. 4). Компьютерный комплекс ANSYS APDL хорошо зарекомендовал себя в ранее проведенных исследованиях автора [16; 17], поэтому он был выбран для исследования рассматриваемых линейчатых оболочек. Были построены модели оболочек в программе ANSYS APDL, к моделям приложена нагрузка в виде собственного веса. Характеристики материала: условный железобетон с модулем упругости $E = 325\,000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.17$, плотность $2\,500$ кг/м³.

Толщина оболочки 12 см. Для построения модели применялись оболочечные конечные элементы типа shell181, конечные элементы другого типа применялись в [16–18].

3. Результаты и обсуждение

При расчете оценивались максимальный прогиб оболочки, нормальные напряжения по разным осям и эквивалентные напряжения.

3.1. Оболочка со срединной поверхностью, показанной на рис. 3, б (тип 1)

Максимальное эквивалентное напряжение $216\,257$ Н/м². Распределение напряжений отличается относительной равномерностью.

Изополя вертикальных перемещений представлены на рис. 5, а изополя эквивалентных напряжений на рис. 6.

3.2. Оболочка со срединной поверхностью, показанной на рис. 4 (тип 2). Получен максимальный прогиб $0,26 \times 10^{-4}$ м, максимальное напряжение $313\,726$ Н/м².

Изополя вертикальных перемещений представлены на рис. 7, а изополя эквивалентных напряжений на рис. 8.

3.3. Оболочка со срединной поверхностью, показанной на рис. 4 (тип 3). Получены максимальные вертикальные перемещения $0,693 \times 10^{-4}$ м.

Максимальные эквивалентные напряжения $401\,179$ Н/м².

Изополя вертикальных перемещений представлены на рис. 9, а изополя эквивалентных напряжений на рис. 10.

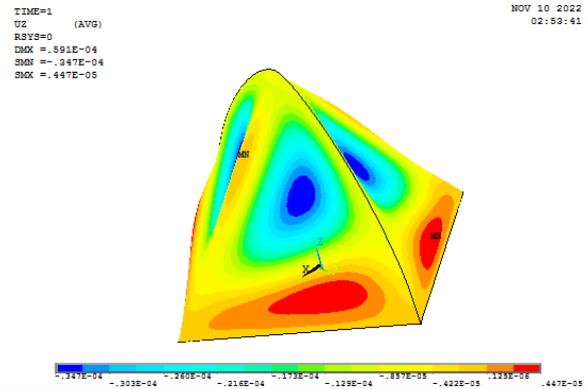


Рис. 5. Изополя перемещений вдоль оси z.
Максимальный прогиб $0,347 \times 10^{-4}$ м.
Figure 5. Isofields of deflections along the z-axis.
The maximum deflection is 0.347×10^{-4} m.

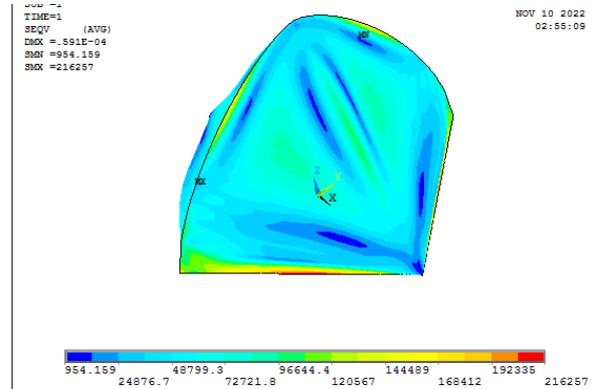


Рис. 6. Изополя эквивалентных напряжений
Figure 6. Isofields of equivalent stresses

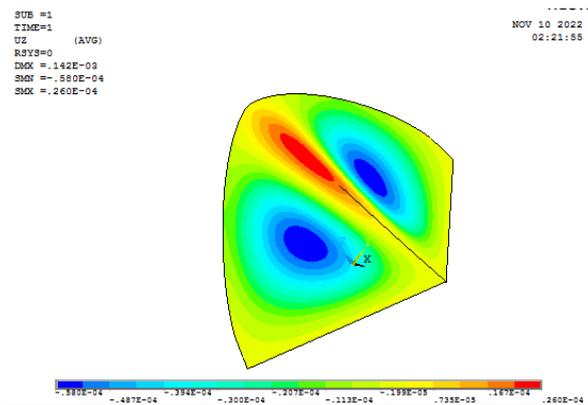


Рис. 7. Изополя перемещений вдоль оси z.
Максимальный прогиб $0,260 \times 10^{-4}$ м.
Figure 7. Isofields of deflections along the z-axis.
The maximum deflection is 0.260×10^{-4} m

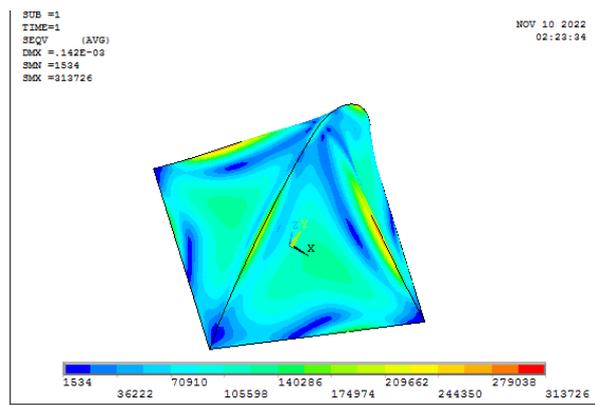


Рис. 8. Изополя эквивалентных напряжений.
Figure 8. Isofields of equivalent stresses

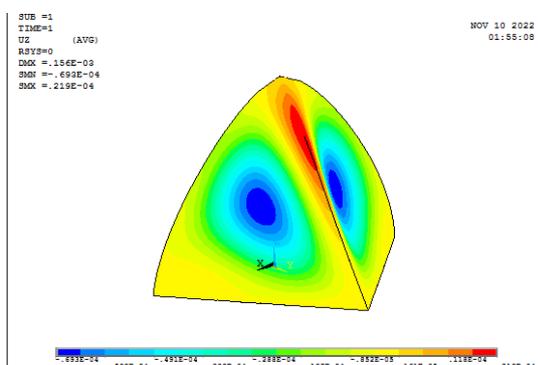


Рис. 9. Перемещения вдоль неподвижной оси z.
Максимальный прогиб $0,219 \times 10^{-4}$ м.
Figure 9. Isofields of deflections along the fixed z-axis.
The maximum deflection is 0.219×10^{-4} m.

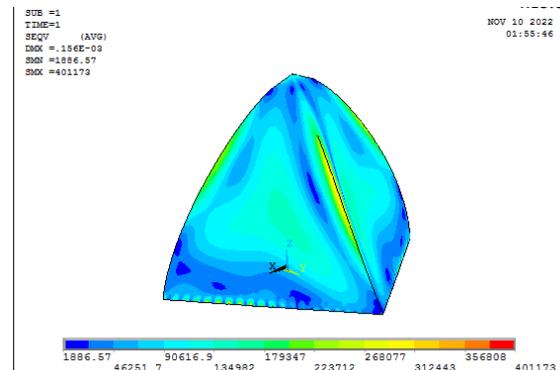


Рис. 10. Изополя эквивалентных напряжений.
Figure 10. Isofields of equivalent stresses

Сравнение показало, что все оболочки имеют выраженные максимумы перемещений. Максимальные напряжения у оболочек 2 и 3 сконцентрированы и значительно превышают средние по всей поверхности в верхней части около ребер, у оболочки 1 распределены более равномерно, что можно считать более выгодным для практического применения.

Наибольшие напряжения и прогибы получены в оболочке третьего типа, минимальные в оболочке второго типа.

В [19] отмечается, что все выдающиеся сооружения, построенные и получившие известность в последнее время, являются тонкими оболочками или оболочечными структурами. А.В. Коротич [20] предлагает использовать линейчатые поверхности в качестве модулей для создания новых сложных архитектурных форм. Вероятно, как вариант линейчатого модуля можно применить и рассматриваемые в данной статье линейчатые поверхности (7)–(9). Исследованиям оболочек, применяющихся в судостроении, посвящены статьи [21–25].

4. Заключение

1. Исследована геометрия одного из видов линейчатых алгебраических поверхностей на ромбовидном плане.

2. Доказано и проиллюстрировано, что, имея одинаковый главный каркас поверхности, можно построить три разные поверхности. Взяв эти три разные линейчатые поверхности в качестве срединных поверхностей тонких строительных оболочек, можно расширить число архитектурных форм, приемлемых для строительной практики.

3. Показана возможность статического расчета рассматриваемых оболочек и намечены пути выбора оптимальных форм линейчатых оболочек выбранного типа в автоматизированном режиме.

Список литературы

1. Мамиева И.А. Линейчатые алгебраические поверхности с главным каркасом из трех суперэллипсов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 4. С. 387–395. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-387-395>
2. Weisstein E.W. Superellipse // From MathWorld. A Wolfram Web Resource. URL: <https://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html> (дата обращения: 22.01.2023).
3. Кривошапко С.Н. Тентовая архитектура // Строительство и реконструкция. 2015. № 3 (59). С. 100–109. EDN: TQTUPZ
4. Карневич В.В. Построение гидродинамических поверхностей каркасами из кривых Ламе на примере корпуса подводной лодки // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 30–37. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-30-37>
5. Krivoshapko S.N. Tangential developable and hydrodynamic surfaces for early stage of ship shape design // Ships and Offshore Structures. 2022. Vol. 18. Issue 5. P. 660–668. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2062165>
6. Mamieva I.A., Gbaguidi-Aisse G.L. Influence of the geometrical researches of rare type surfaces on design of new and unique structures // Строительство и реконструкция. 2019. № 5(85). С. 23–34. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-85-5-23-34>
7. Коротич А.В. Новые архитектурные формы линейчатых квазимногогранников // Архитектон: известия вузов. 2015. № 2 (50). С. 31–46. EDN: TZXCBOB
8. Мамиева И.А. Аналитические поверхности для параметрической архитектуры в современных зданиях и сооружениях // Academia. Архитектура и строительство. 2020. № 1. С. 150–165. EDN: KNYKTY
9. Shelden D.R. Digital surface representation and the constructability of Gehry's architecture // Thesis (PhD). Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2002. 340 p. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/16899> (accessed: 22.01.2023)
10. Воличенко О.В. Концепции нелинейной архитектуры // Архитектон: известия вузов. 2013. № 44. С. 21–39. EDN: RRZMFX
11. Hecker Z. The cube and the dodecahedron in my polyhedral architecture // Leonardo. 1980. Vol. 13. P. 272–275. URL: <https://muse.jhu.edu/article/599543/pdf> (accessed: 22.01.2023).
12. Бондаренко И.А. Об уместности и умеренности архитектурных новаций // Academia. Архитектура и строительство. 2020. № 1. С. 13–18. EDN: PCRPPG
13. Кривошапко С.Н. Гидродинамические поверхности // Судостроение. 2021. № 3. С. 64–67. http://dx.doi.org/10.54068/00394580_2021_3_64
14. Кривошапко С.Н. Классификация линейчатых поверхностей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2006. № 1. С. 10–20. EDN: JSISGF

15. Krivoshapko S.N. The application of conoid and cylindroid in forming of buildings and structures of shell type // *Building and Reconstruction*. 2017. № 5 (73). P. 34–44. EDN: ZUCUTX
16. Tupikova E.M., Ershov M.E. Trial design of umbrella type shell structures // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2021. Т. 17. № 4. С. 414–424. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-414-424>
17. Тупи́кова Е.М. Выбор оптимальной оболочки покрытия на квадратном плане в виде поверхности переноса // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. Т. 15. № 5. С. 367–373. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-367-373>
18. Алёшина О.О., Иванов В.Н., Кахамарка-Сунига Д. Анализ напряженного состояния оболочки одинакового ската при действии равномерно распределенной касательной нагрузки различными методами // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2021. Т. 17. № 1. С. 51–62. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-1-51-62>
19. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Выдающиеся пространственные сооружения последних 20 лет // *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2012. № 12. С. 8–14. EDN: UDJITZ
20. Коротич А.В. Архитектоника плотнейших пространственных компоновок из модулей с линейчатыми поверхностями // *Дизайн и технологии*. 2021. № 83–84 (125–126). С. 6–12. EDN: НРУТЕХ
21. Kwang H.K. A survey: application of geometric modeling techniques to ship modeling and design // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2010. Vol. 2. P. 177–184. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0034>
22. Janson C., Larsson L. A method for the optimization of ship hulls from a resistance point of view // *Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamic*. Washington: The National Academies Press. 1997. P. 680–696. <https://doi.org/10.17226/5870>
23. Tober H. Evaluation of drag estimation methods for ship hulls. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences. 2020. 67 p.
24. Oetter R., Barry C.D., Duffy B., Welter J. Block construction of small ships and boats through use of developable panels // *Journal of Ship Production*. 2002. Vol. 18. Issue 02. P. 65–72. <http://doi.org/10.5957/jsp.2002.18.2.65>
25. Perez-Arribas F., Fernandez-Jambrina L. Computer-aided design of developable surfaces: Designing with developable surfaces. surfaces // *Journal of Computers*. 2018. Vol. 13. Issue 10. P. 1171–1176. <http://doi.org/10.17706/jcp.13.10.1171-1176>

References

1. Mamieva I.A. Ruled algebraic surfaces with main frame from three superellipses. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(4):387–395. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-4-387-395>
2. Weisstein E.W. Superellipse. *From MathWorld. A Wolfram Web Resource*. Available from: <https://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html> (accessed: 22.01.2023)
3. Krivoshapko S.N. Tent Architecture. *Building and reconstruction*. 2015;3(59):100–109. EDN: TQTUPZ
4. Karnevich V.V. Generating hydrodynamic surfaces by families of Lamé curves for modelling submarine hulls. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):30–37. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-30-37>
5. Krivoshapko S.N. Tangential developable and hydrodynamic surfaces for early stage of ship shape design. *Ships and Offshore Structures*. 2022;18(5):660–668 <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2062165>
6. Mamieva I.A., Gbaguidi-Aisse G.L. Influence of the geometrical researches of rare type surfaces on design of new and unique structures. *Building and Reconstruction*. 2019;5(85):23–34. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-85-5-23-34>
7. Korotich A.V. New architectural forms of ruled quasipolyhedrons. *Architecton: Proceedings of higher education*. June 2015;50:31–46. (In Russ.) EDN: TZXC0B
8. Mamieva I.A. Analytical surfaces for parametric architecture in contemporary buildings and structures. *Academia. Architecture and Construction*. 2020;1:150–165. (In Russ.) EDN: KNYKTY
9. Shelden D.R. *Digital surface representation and the constructability of Gehry's architecture*. Thesis (PhD). Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2002. Available from: <http://hdl.handle.net/1721.1/16899> (accessed: 22.01.2023)
10. Volichenko O.V. Conceptions of non-linear architecture. *Architecton: Proceedings of higher education*. 2013; 44:21–39 (In Russ.) EDN: RRZMFX
11. Hecker Z. The cube and the dodecahedron in my polyhedral architecture. *Leonardo*. 1980;13:272–275. Available from: <https://muse.jhu.edu/article/599543/pdf> (accessed: 22.01.2023)
12. Bondarenko I.A. On the appropriateness and moderation of architectural innovation. *Academia. Architecture and construction*. 2020;1:13–18. (In Russ.) EDN: PCRPPG
13. Krivoshapko S.N. Hydrodynamic surfaces. *Sudostroeniye*. 2021;(3):64–67. (In Russ.) http://doi.org/10.54068/00394580_2021_3_64

14. Krivoshapko S.N. Classification of ruled surfaces. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2006;1:10–20.
15. Krivoshapko S.N. The application of conoid and cylindroid in forming of buildings and structures of shell type. *Building and Reconstruction*. 2017;5(73):34–44. EDN: ZUCUTX
16. Tupikova E.M., Ershov M.E. Trial design of umbrella type shell. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(4):414–424. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-4-414-424>
17. Tupikova E.M. Optimization study of shape of translational shell of square plan. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(5):367–373. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-367-373>
18. Aleshina O.O., Ivanov V.N., Cajamarca-Zuniga D. Stress state analysis of an equal slope shell under uniformly distributed tangential load by different methods. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(1):51–62. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-1-51-62>
19. Krivoshapko S.N., Mamieva I.A. The outstanding spatial erections of the last 20 years. *Montazhnye i Spetsial'nye Raboty v Stroitel'stve [Installation and special works in construction]*. 2012;12:8–14. (In Russ.) EDN: UDJITZ
20. Korotich A.V. Architectonics of densest modules filling space with linear surfaces. *Dizain i Tekhnologii [Design and Technologies]*. 2021;83-84(125–126):6–12 (In Russ.) EDN: HPYTEX
21. Kwang H.K. A survey: application of geometric modeling techniques to ship modeling and design. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2010;2:177–184. <http://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0034> 12
22. Janson C., Larsson L. A method for the optimization of ship hulls from a resistance point of view. *Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamic*. Washington: The National Academies Press. 1997;680–696 <https://doi.org/10.17226/5870>
23. Tober H. Evaluation of drag estimation methods for ship hulls. *Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences*, 2020.
24. Oetter R., Barry C.D., Duffty B., Welter J. Block construction of small ships and boats through use of developable panels. *Journal of Ship Production*. 2002;18(2):65–72. <http://doi.org/10.5957/jsp.2002.18.2.65>
25. Perez-Arribas F., Fernandez-Jambrina L. Computer-aided design of developable surfaces: Designing with developable surfaces. *Journal of Computers*. 2018;13(10):1171–1176. <http://doi.org/10.17706/jcp.13.10.1171-1176>