



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-207-212
УДК 629.5.083.5

Научная статья / Research article

Алгебраические судовые поверхности с каркасом из трех плоских кривых в координатных плоскостях

С.Н. Кривошапко

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
✉ sn_krivoshapko@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 25 июня 2022 г.
Доработана: 20 августа 2022 г.
Принята к публикации: 5 сентября 2022 г.

Ключевые слова:

судовой корпус, суперэллипс, компьютерное моделирование, ватерлиния, мидельшпангоут, главный батокс, алгебраическая поверхность

Аннотация. Выбор рациональной формы поверхности для судовых корпусов – одна из важных задач корабельных архитекторов и проектировщиков. Часто выбор формы основывается на эмпирических формулах или интуиции проектировщика. В исследовании рассматривается методика определения обобщенных явных алгебраических уравнений теоретической формы корпуса судна с наперед заданными тремя главными поперечными сечениями, совпадающими с ватерлинией, главным батоксом (килевой линией) и мидельшпангоутом, которые принимаются в форме суперэллипсов или в форме любой алгебраической кривой. Приведенная тройка алгебраических уравнений поверхностей с одинаковым каркасом из трех плоских кривых описывает бесконечное число форм судовых поверхностей. Показывается, что, имея одинаковые три плоские кривые главного каркаса, можно получить три алгебраические поверхности разных порядков. Выбрать оптимальную форму, в том числе с цилиндрической вставкой или принимая форму корпуса, состоящую из двух разных – кормовой и носовой – оконечностей, стыкующихся гладко по мидельшпангоуту, возможно с помощью методов компьютерного моделирования с привлечением искусственного интеллекта, используя материалы исследования. Приведенные результаты применимы для проектирования подводных аппаратов на начальном этапе.

Для цитирования

Кривошапко С.Н. Алгебраические судовые поверхности с каркасом из трех плоских кривых в координатных плоскостях // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 207–212. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-207-212>

Algebraic ship hull surfaces with a main frame from three plane curves in coordinate planes

Sergey N. Krivoshapko

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation
✉ sn_krivoshapko@mail.ru

Article history

Received: June 25, 2022
Revised: August 20, 2022
Accepted: September 5, 2022

Abstract. One of the important problems of naval architects and designers is a choice of rational ship hull shape. A choice of ship hull form is based often on empirical formulae or on designers' intuition. In the study, a method of determination of generalized explicit algebraic equations of theoreti-



Keywords:

ship hull, superellipse, computer modeling, waterline, main buttock, midship section, algebraic surface

cal ship hull configuration with three main cross sections given in advance and coinciding with waterline, main buttock (keel line), and midship section that are taken in the form of superellipses or in the form of any algebraic curve. Presented three of algebraic equations of surfaces with the same frame from three plane curves describes infinite number of ship hull surfaces. Having the same three plane curves one can get three algebraic surfaces of different order. The optimal shape, including cylindrical fragment or the ship hull shape containing two different – stern and bow – parts, joining along midship section, can be chosen with the help of methods of computer modelling with the application of artificial intellect using the materials of the paper. One can apply given results for the design of underwater apparatus on the early stage of the design.

For citation

Krivoshapko SN. Algebraic ship hull surfaces with a main frame from three plane curves in coordinate planes. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):207–212. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-207-212>

Введение

Е.Я. Авдоньев [1] показал, что имея три плоские кривые (рис. 1), совпадающие с мидельшпангоутом (в сечении плоскостью yOz), главным батоксом (в сечении диаметральной плоскостью xOz) и ватерлинией (в сечении плоскостью xOy), можно построить три алгебраические поверхности разных порядков. Одну из них можно взять в первом приближении за форму проектируемого судового корпуса. Далее по необходимости можно приступить к формированию цилиндрической вставки, или принять форму корпуса, состоящую из двух разных поверхностей (носая часть и кормовая оконечность) и стыкующихся гладко по мидельшпангоуту. Приняв полученную базовую форму как первый шаг к получению новой формы путем итерации, можно приступить к оптимизации формы корпуса [2]. Например, аппроксимировать базовую форму кусками развертывающейся поверхности, что упростит [3] и удешевит [4] изготовление обшивки.

1. Обзор исследований по формированию рациональных судовых корпусов

По-видимому, Е.А. Авдоньев [1] впервые предложил проектировать судовые корпуса, имея в наличии заданные плоские кривые, лежащие в трех главных координатных плоскостях и совпадающие с ватерлинией (кривая 1 в плоскости $z = 0$), мидельшпангоутом (кривая 2 в плоскости $x = 0$) и главным батоксом (кривая 3 в плоскости $y = 0$) (рис. 1).

Используя методику, изложенную в [1], С.Н. Кривошапко [5] получил уравнения тройки алгебраических поверхностей, содержащих один и тот же каркас их плоских кривых. В первом

примере за плоские кривые взяты в качестве кривой 1 квадратная парабола

$$y = \pm W[1 - (x/L)^2], \quad (1)$$

в качестве кривой 2 взят эллипс

$$(y/W)^2 + (z/T)^2 = 0, \quad (2)$$

а в качестве кривой 3 взята квадратная парабола

$$z = -T + T(x/L)^2. \quad (3)$$

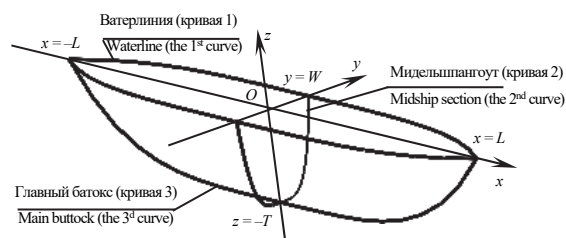


Рис. 1. Поверхность с каркасом из трех плоских кривых
Figure 1. A surface with frame from three plane curves

В итоге получено алгебраическое уравнение четвертого порядка первой поверхности, образованной семейством параболических линий, лежащих в плоскостях $z = \text{const}$ (рис. 1):

$$\pm y = W \sqrt{1 - \frac{z^2}{T^2}} \left[1 - \frac{x^2}{L^2 \left(1 + \frac{z}{T}\right)} \right]. \quad (4)$$

Получено также алгебраическое уравнение четвертого порядка второй гидродинамической поверхности, образованной семейством эллиптических сечений $x = \text{const}$:

$$T^2y^2 + W^2z^2 = W^2T^2(1 - x^2/L^2)^2. \quad (5)$$

И, наконец, третья поверхность, образованная семейством параболических линий $y = \text{const}$, будет иметь следующую форму задания:

$$z = -T\sqrt{1 - \frac{y^2}{W^2}} \left(1 - \frac{x^2}{L^2\left(1 - \frac{y}{W}\right)}\right). \quad (6)$$

Алгебраическая поверхность (6) является поверхностью пятого порядка.

Подставляя $z = 0$ в уравнения трех поверхностей (4)–(6), получаем уравнение ватерлинии (1). Подставляя $x = 0$, получаем уравнение кривой 2, а при $y = 0$ – уравнение кривой 3. Следовательно три поверхности (4)–(6) имеют один и тот же каркас из заданных плоских кривых (1)–(3).

Рассмотрим сечения $x = x_c = \text{const}$ на поверхности (5):

$$\frac{z^2}{T^2\left(1 - \frac{x_c^2}{L^2}\right)^2} + \frac{y^2}{W^2\left(1 - \frac{x_c^2}{L^2}\right)^2} = 1. \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что все сечения $x = x_c = \text{const}$ на поверхности (5) будут эллиптическими. А сечения $x = x_c = \pm L$ вырождаются в точки $z = y = 0$ (рис. 1).

По аналогии можно показать, что сечения $y = y_c = \text{const}$ и $z = z_c = \text{const}$ на поверхности (5) не будут параболическими.

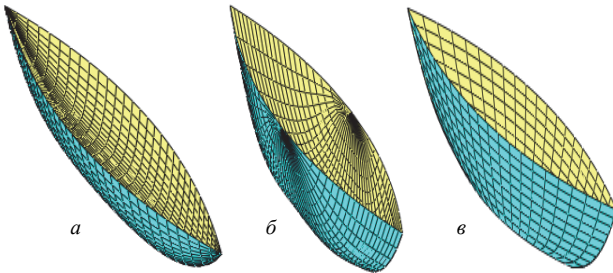


Рис. 2. Поверхности, построенные по формулам: а – (8); б – (9); в – (10)
Figure 2. Surfaces designed with the help of the formulae: а – (8); б – (9); в – (10)

В [5] дан второй пример с плоскими кривыми каркаса, где ватерлиния дана в виде квадратной параболы, а главный батокс и мидельшпангоут представлены в виде биквадратных парабол. В этом случае тройку поверхностей можно задать алгебраическими уравнениями:

– поверхность седьмого порядка образована биквадратными параболой в сечениях $x = \text{const}$:

$$z = T \left[\frac{x^4}{L^4} + \frac{\left(1 + \frac{x^2}{L^2}\right)}{W^4\left(1 - \frac{x^2}{L^2}\right)^3} y^4 \right]; \quad (8)$$

– поверхность восьмого порядка образована биквадратными параболой в сечениях $y = \text{const}$:

$$z = T \left[\frac{y^4}{W^4} + \frac{x^4\left(1 - \frac{y^4}{W^4}\right)}{L^4\left(1 - \frac{y}{W}\right)^2} \right]; \quad (9)$$

– поверхность одиннадцатого порядка образована квадратными параболой в сечениях $z = \text{const}$:

$$y = W\sqrt[4]{\frac{z}{T}} \left(1 - \frac{x^2}{L^2\sqrt{\frac{z}{T}}}\right). \quad (10)$$

На рис. 2 показаны поверхности, задаваемые формулами (8)–(10). Предварительно поверхности (8)–(10) были переведены в параметрическую форму задания [5].

Еще два примера приведены в [6]. Здесь задан следующий каркас из трех плоских кривых (рис. 1):

– ватерлиния в форме параболы 4-го порядка в плоскости xOy :

$$y = \pm W(1 - x^4/L^4); \quad (11)$$

– мидельшпангоут в форме кривой 6-го порядка в плоскости yOz :

$$z = -T\sqrt{1 \mp \left(\frac{y}{W}\right)^{\frac{1}{3}}}; \quad (12)$$

– главный батокс в форме параболы 4-го порядка в плоскости xOz :

$$z = T(x^4/L^4 - 1). \quad (13)$$

Три поверхности, содержащие три плоские кривые (11)–(13), можно задать в явном виде:

– образующие сечения $x = \text{const}$:

$$z = T\left(\frac{x^4}{L^4} - 1\right) \sqrt{1 - \left(\frac{y}{W\left(1 - \frac{x^4}{L^4}\right)}\right)^{\frac{1}{3}}}; \quad (14)$$

– образующие сечения $y = \text{const}$:

$$z = T \sqrt{1 \mp \sqrt[3]{\frac{y}{W}}} \cdot \left[\frac{W}{L^4(W \mp y)} x^4 - 1 \right]; \quad (15)$$

образующие сечения $z = \text{const}$:

$$y = \mp \frac{W}{T^6} (z^2 - T^2)^3 \left[1 - \frac{x^4 T}{L^4(z+T)} \right]. \quad (16)$$

Во втором примере в [6] все три кривые главного каркаса являются биквадратными парабололами. В этом случае также можно получить три поверхности:

– образующие сечения $x = \text{const}$:

$$z = -T \left[1 - \frac{x^4}{L^4} - \frac{y^4}{W^4 \left(1 - \frac{x^4}{L^4} \right)^3} \right]; \quad (17)$$

– образующие сечения $y = \text{const}$:

$$z = -T \left(1 - \frac{y^4}{W^4} \right) \left(1 - \frac{x^4}{L^4 \left(1 \mp \frac{y}{W} \right)} \right); \quad (18)$$

– образующие сечения $z = \text{const}$:

$$y = \pm W^4 \sqrt{1 + \frac{z}{T}} \left[1 - \frac{x^4}{L^4(1+z/T)} \right]. \quad (19)$$

2. Обобщенный подход к поиску рациональных алгебраических судовых поверхностей

Предположим, что плоские кривые главного каркаса рассматриваемых поверхностей (рис. 1) заданы в виде [7]:

– ватерлиния (кривая 1):

$$|y|^r = W^r \left(1 - \frac{|x|^t}{L^t} \right); \quad (20)$$

– мидельшпангоут (кривая 2):

$$|z|^n = T^n \left(1 - \frac{|y|^m}{W^m} \right); \quad (21)$$

– главный батокс (кривая 3):

$$|z|^s = T^s \left(1 - \frac{|x|^k}{L^k} \right), \quad (22)$$

где для выпуклых кривых $r, t, n, m, s, k > 1$; для вогнутых кривых $r, t, n, m, s, k < 1$.

Используя методику, изложенную в [1; 5–8], можно получить явные уравнения трех алгебраических поверхностей с одним и тем же главным каркасом (20)–(22):

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

$$|z| = T \left(1 - \frac{|x|^k}{L^k} \right)^{\frac{1}{s}} \times \left[1 - |y/W|^m / (1 - |x/L|^t)^{m/r} \right]^{1/n}; \quad (23)$$

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

$$|z| = T (1 - |y|^m / W^m)^{1/n} \times \left[1 - |x/L|^k / (1 - |y/W|^r)^{k/t} \right]^{1/s}; \quad (24)$$

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

$$|y| = W (1 - |z|^n / T^n)^{1/m} \times \left[1 - |x/L|^t / (1 - |z/T|^s)^{t/k} \right]^{1/r}. \quad (25)$$

Формулы (20)–(22) и (23)–(25) имеют одинаковую структуру. Пользуясь тензорными обозначениями, их можно записать в виде двух формул.

Такой подход к проектированию судовых корпусов дает возможность получить явные уравнения теоретических корпусов в неограниченном количестве. Если принять $r = t, n = m, s = r$, то плоские кривые (20)–(22) будут представлять собою суперэллипсы. Если дополнительно взять, что $W = L = T$, то суперэллипсы становятся кривыми Ламе.

Положив в уравнениях (23)–(25) $z = 0$, получим уравнение ватерлинии (20), при $x = 0$ получаем уравнение мидельшпангоута (21), а при $y = 0$ – уравнение главного батокса (22). Уравнения (23)–(25) описывают все ранее полученные в [1; 5–6] судовые поверхности.

Например, рассматривая формулы (1)–(3) и сравнивая их с формулами (20)–(22), находим показатели степеней $r = 1, t = 2, n = m = 2, s = 1, k = 2$. Подставляя эти значения в уравнения (23)–(24), получаем уравнения рассматриваемых поверхностей (4)–(6).

Подставляя показатели степеней $r = 1, t = 2, n = 1, m = 4, s = 1, k = 4$ в уравнения (23)–(24), получаем уравнения трех гидродинамических поверхностей (8)–(10), которые изображены на рис. 2.

Сравнивая уравнения (11)–(13) и (20)–(22), определяем $r = 1, t = 4, n = 2, m = 1/3, s = 1, k = 4$. Подставляем эти значения в уравнения (23)–(25), получаем уравнения трех гидродинамических поверхностей (14)–(16), рассмотренных в [3].

Для кривых главного каркаса 4-го порядка имеем $r = 1, t = 4, n = 1, m = 4, s = 1, k = 4$. Подстановкой полученных показателей степеней в уравнения (23)–(25), находим уравнения трех поверхностей (17)–(19).

3. Результаты

Таким образом, нет необходимости рассматривать каждую тройку поверхностей с одинаковым главным каркасом, как это делалось в статьях [1; 5; 6]. Формулы (23)–(25) описывают весь набор алгебраических поверхностей, задаваемых в явном виде. В [8] мидельшпангоут (кривая 2) рассматривается уже как суперэллипс (21), что расширяет возможности компьютерного моделирования. В [7] используются формулы (20)–(22) и (23)–(25) применительно к суперэллипсам для моделирования замкнутых составных поверхностей.

Однако не все алгебраические кривые позволяют задать себя в виде (20)–(22), и, соответственно, не всегда будет возможность использовать формулы (23)–(25). Два примера с кривыми Агнеси, входящими в главный каркас гидродинамических поверхностей рассмотрены в [9].

Как отмечается в [6], выбор формы корпуса обусловлен многими факторами: назначение судна, очертание ватерлинии, сопротивление воды, трудоемкость изготовления [10], разделение на конструктивные модули [11], скорость движения судна [12], архитектурные требования [13] и др. [14]. Эти факторы влияют на выбор плоских кривых основного каркаса. Наличие формул (20)–(22) и (23)–(25) позволит облегчить выбор поверхности судового корпуса, используя аналитические зависимости, что может снизить первоначальные затраты на начальных этапах проектирования.

Имея аналитические поверхности (23)–(25), дальше можно рассматривать вопросы формовки внешнего судового корпуса из тонкого листа [4; 15], решать проблемы прочности и т. д.

Заключение

Представленные материалы позволяют поставить выбор рациональной (оптимальной) судовой поверхности в автоматизируемом режиме.

После того как выбрана подходящая форма судовой поверхности, судовые архитекторы начинают работать над формообразованием судового корпуса, поэтому часто требуется аппроксимация теоретической судовой поверхности торсовой. В этом случае наиболее подходящим вариантом будет поверхность, сформированная семейством линий, лежащих в плоскостях $z = \text{const}$. Эта поверхность поддается аппроксимации торсовыми полосами лучше всего.

Список литературы

1. Авдоньев Е.Я. Аналитическое описание корпусных поверхностей // Прикладная геометрия и инженерная графика. Киев, 1972. Вып. 15. С. 156–160.
2. Janson C., Larsson L. A method for the optimization of ship hulls from a resistance point of view // National Research Council. Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamic. Washington: The National Academies Press, 1997. Pp. 680–696. <https://doi.org/10.17226/5870>
3. Oliveira M.C., Fernandes José V. Modelling and simulation of sheet metal forming processes // Metals. 2019. Vol. 9. No. 12. Article number: 1356. <https://doi.org/10.3390/met9121356>
4. 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. No. 2. Pp. 65–72. <https://doi.org/10.5957/jsp.2002.18.2.65>
5. Кривошапко С.Н. Гидродинамические поверхности // Судостроение. 2021. № 3. С. 64–67. https://doi.org/10.54068/00394580_2021_3_64
6. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Алгебраические поверхности для рациональных судовых корпусов // Технология машиностроения. 2022. № 3. С. 17–24. <https://doi.org/10.34641/ТМ.2022.237.3.016>
7. Карневич В.В. Построение гидродинамических поверхностей каркасами из кривых Ламе на примере корпуса подводной лодки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 30–37. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-30-37>
8. Karnevich V.V. Hydrodynamic surfaces with midship section in the form of the Lamé curves // RUDN Journal of Engineering Researches. 2021. Vol. 22. No. 4. Pp. 323–328. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328>
9. Krivoshapko S.N. Tangential developable and hydrodynamic surfaces for early stage of ship shape design // Ships and Offshore Structures. 2022. Pp. 1–9. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2062165>

10. Морозов В.Н., Цветков В.В. К вопросу выбора схемы изготовления днищевых секций корпусов // Вестник Российской академии естественных наук: сборник научных трудов. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2013. Вып. 7. С. 80–85.

11. Розинов А.Я. Технологическое совершенствование конструкции корпуса катеров и процесса их сборки // Технология машиностроения. 2020. № 5. С. 15–23.

12. Бронский А.И., Глоzman М.К., Козляков В.В. Основы выбора конструкций корпуса судна. Л.: Судостроение, 1974. 250 с.

13. Kwang Hee Ko. A survey: Application of geometric modeling techniques to ship modeling and design // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2010. Vol. 2. Pp. 177–184. <http://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0034>

14. Zhang Sh., Tezdogan T., Zhang B., Lin L. Research on the hull form optimization using the surrogate models // Engineering Applications of Computational Mechanics. 2021. Vol. 15. Issue 1. Pp. 747–761. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1915875>

15. Баджория Г.Ч. Об одном методе построения развертки торсовой поверхности // Судостроение. 1984. № 9. С. 37–38.

References

1. Avdonev EYa. Analytical description of the ship hull surfaces. *Prikladnaya Geometriya i Inzhenernaya Grafika* (issue 15). Kiev; 1972. p. 156–160. (In Russ.)

2. Janson C, Larsson L. A method for the optimization of ship hulls from a resistance point of view. *National Research Council. Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamic*. Washington: The National Academies Press; 1997. p. 680–696. <https://doi.org/10.17226/5870>

3. Oliveira MC, Fernandes José V. modelling and simulation of sheet metal forming processes. *Metals*. 2019;9(12):1356. <https://doi.org/10.3390/met9121356>

4. Oetter R, Barry CD, Duffty B, Welter J. Block construction of small ships and boats through use of de-

velopable panels. *Journal of Ship Production*. 2002;18(2): 65–72. <https://doi.org/10.5957/jsp.2002.18.2.65>

5. Krivoshapko SN. Hydrodynamic surfaces. *Shipbuilding*. 2021;(3):64–67. (In Russ.) https://doi.org/10.54068/00394580_2021_3_64

6. Krivoshapko SN, Ivanov VN. Algebraic surfaces for rational ship hulls. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2022;(3):17–24. <https://doi.org/10.34641/TM.2022.237.3.016>

7. Karnevich VV. 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>

8. Karnevich VV. Hydrodynamic surfaces with midship section in the form of the Lamé curves. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2021;22(4):323–328. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328>

9. Krivoshapko SN. Tangential developable and hydrodynamic surfaces for early stage of ship shape design. *Ships and Offshore Structures*. 2022:1–9. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2062165>

10. Morozov BN, Tzvetkov VV. On the question of choice of scheme of making bottom section of hulls. *Vesnik RAEN* (issue 7). Kaliningrad: KGTU Publ.; 2013. p. 80–85. (In Russ.)

11. Rozinov AYa. Technological improvement of the hull boats design and the process of their assembly. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2020;(5):15–23. (In Russ.)

12. Bronskiy AI, Glozman MK, Kozlyakov VV. *The basis of choice of structures of ship hull*. Leningrad: Sudostroeniye Publ.; 1974. (In Russ.)

13. Kwang Hee Ko. 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>

14. Zhang Sh, Tezdogan T, Zhang B, Lin L. Research on the hull form optimization using the surrogate models. *Engineering Applications of Computational Mechanics*. 2021; 15(1):747–761. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1915875>

15. Bajoria GCh. On one method of the development of a torse surface. *Shipbuilding*. 1984;(9):37–38.

Сведения об авторе

Кривошапко Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор департамента строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-9385-3699, Scopus Author ID: 6507572305, eLIBRARY SPIN-код: 2021-6966; sn_krivoshapko@mail.ru

About the author

Sergey N. Krivoshapko, DSc, Professor of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9385-3699, Scopus Author ID: 6507572305, eLIBRARY SPIN-code: 2021-6966; sn_krivoshapko@mail.ru