



DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-3-283-292
УДК 629.5.083.5

Научная статья / Research article

Алгебраические поверхности для судовых корпусов

С.Н. Кривошапко , В.Н. Иванов 

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

История статьи

Поступила в редакцию: 12 августа 2021 г.
Доработана: 1 ноября 2021 г.
Принята к публикации: 11 ноября 2021 г.

Ключевые слова:

гидродинамическая поверхность, батокс, ватерлиния, мидель-шпангоут, судовой корпус, оптимизация формы

Аннотация. Выбор оптимальной формы поверхности для судовых корпусов – одна из главных задач корабельных архитекторов и проектировщиков. Часто выбор формы основывается на эмпирических формулах или интуиции проектировщика. В статье приводится методика определения явных алгебраических уравнений теоретической формы корпуса судна с наперед заданными тремя главными поперечными сечениями, совпадающими с ватерлинией, главным батоксом и мидель-шпангоутом. Эти алгебраические поверхности названы гидродинамическими. Методика проиллюстрирована для трех троек главных сечений корпуса судна, то есть построены девять гидродинамических поверхностей. Для удобства компьютерного моделирования все явные алгебраические уравнения переведены в параметрическую форму. С их помощью визуализированы девять судовых поверхностей, предлагаемых к внедрению. Изменяя константы, содержащиеся в уравнениях поверхностей, то есть корректируя формы трех главных геометрических параметров корпуса судна, можно подобрать наиболее рациональную форму судовой поверхности в первом приближении, а затем приступить к планированию цилиндрических вставок или комбинировать носовую и кормовую оконечности судна из различных фрагментов алгебраических поверхностей, но с одинаковыми мидель-шпангоутами. Исследование охватывает только геометрические вопросы проектирования теоретической формы судна.

Для цитирования

Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Алгебраические поверхности для судовых корпусов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 3. С. 283–292. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-3-283-292>

Analytical surfaces for ship hulls

Sergey N. Krivoshapko , Vyacheslav N. Ivanov 

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

Article history

Received: August 12, 2021
Revised: November 1, 2021
Accepted: November 11, 2021

Abstract. The choice of optimal shape of ship hull surface is one of the main problems of ship architects and designs. A choice of the form is based on empirical formulae or on intuition of designers. In the article a method of determination of explicit algebraic equations of theoretical



Keywords:

hydrodynamic surface, buttock line, waterline, midship section, ship hull, optimization of shape

shape of ship hull with three main cross-sections given in advance and coinciding with the design waterline, the midship section, and with the main buttock line is given. The forms of the lines in the main cross-sections are chosen from conditions taken in advance. These surfaces are called hydrodynamic. A method is illustrated for three three of main cross-sections of the ship hulls, i.e. nine hydrodynamic surfaces were constructed. All algebraic equations were converted to parametrical form for comfort of computer modelling. With their help, all nine ship surfaces proposed for the introduction were visualized. Having changed constants containing in the surface equations, i.e. correcting the forms of three main geometric parameters of ship hull, one can select the most rational shape of hull surface for the first approach. Further, it is possible to begin planning parallel middle bodies or to combine bow and stern extremities of a ship from different fragments of algebraic surfaces but with the same midship sections. In a paper, only geometrical problems of design of theoretical hull shape are described.

For citation

Krivoshapko SN, Ivanov VN. Analytical surfaces for ship hulls. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(3): 283–292. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-3-283-292>

Введение

В настоящее время построено много судов различного назначения с разнообразными формами судовых корпусов (рис. 1). Выбор формы корпуса обусловлен многими факторами: назначение судна, очертание ватерлинии, сопротивление воды, трудоемкость изготовления [1], разделение на конструктивные модули [2], скорость движения судна [3], архитектурные требования и др. Например, в [4] приводятся результаты испытаний 20 моделей корабельных корпусов и показывается большое влияние главных геометрических параметров на гидродинамические качества корпуса.

Некоторые конструкторы предлагают использовать для формообразования судовых корпусов аэро/гидродинамические поверхности с тремя наперед заданными плоскими кривыми, лежащи-

ми в главных взаимно перпендикулярных сечениях корпуса судна (рис. 2). Наиболее активно в этом направлении работают Е.Я. Авдоньев [5; 6] и С.М. Протодяконов [7], С.Н. Кривошапко [8; 9], А.Ю. Логинов [10], Kwang Hee Ko [11] и др.

Имея три плоские кривые, которые совпадают с мидель-шпангоутом (в сечении плоскостью yOz), главным батоксом (в сечении диаметральной плоскостью xOz) и ватерлинией (в сечении плоскостью xOy), можно построить три отличающиеся друг от друга алгебраические поверхности. 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 (носовая часть и кормовая оконечность) и стыкующихся по мидель-шпангоуту.



Рис. 1. Формы судовых корпусов:
а – грузовое судно; б – пассажирское судно; в – корпус строящейся яхты
(фотографии б и в С.Н. Кривошапко, В.Н. Иванова)

Figure 1. The shapes of ship hulls:
а – a cargo vessel; б – a passenger ship; в – a hull of the building yacht
(photos б and в by S.N. Krivoshapko, V.N. Ivanov)

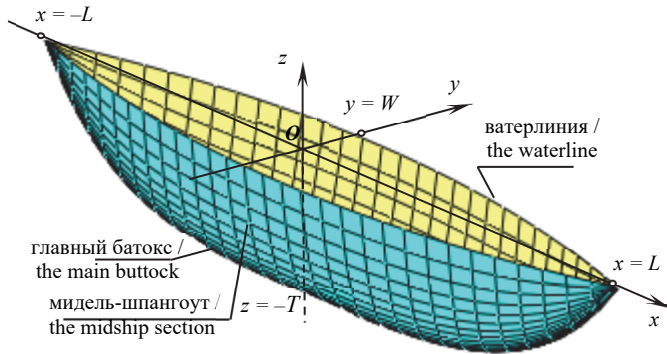


Рис. 2. Гидродинамическая поверхность с каркасом из квадратной параболы, параболы 4-го порядка и параболы 4-го порядка
Figure 2. A hydrodynamic surface with the frame from the second order parabola, the fourth order parabola, and the fourth order parabola



Рис. 3. Корпус судна, аппроксимированный кусками торсовой обшивки (фотография с сайта <http://www.ladverf.ru/page/3/>)
Figure 3. The ship hull that is approximated by the fragments of torse skin (photo from the website <http://www.ladverf.ru/page/3/>)

В [12] используется метод оптимизации формы корпуса, когда базовая форма выбирается как первый шаг к получению новой формы путем итерации.

В настоящей статье будем называть рассматриваемые поверхности просто гидродинамическими, как в [9], а более точно – гидродинамическими поверхностями с главным каркасом из заданных плоских кривых, совпадающими с ватерлинией, мидель-шпангоутом и главным батоксом (килевой линией).

Гидродинамические поверхности не могут быть разворачивающимися [13], что удорожает формообразование корпуса, поэтому их часто аппроксими-

руют кусками разворачивающихся (торсовых) поверхностей (рис. 3), что мало влияет на ходовые качества судна [14], но упрощает их изготовление [15].

1. Примеры алгебраических поверхностей с одинаковым каркасом из трех плоских линий

При построении гидродинамических поверхностей будем использовать методику, изложенную в [5] и апробированную в [9]. Все основные наперед заданные габариты (T, W, L) проектируемого судового корпуса показаны на рис. 4.

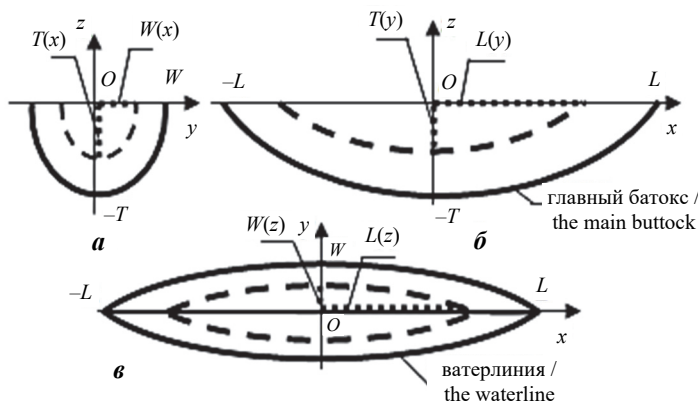


Рис. 4. Главные сечения гидродинамической поверхности
Figure 4. The main sections of hydrodynamic surface

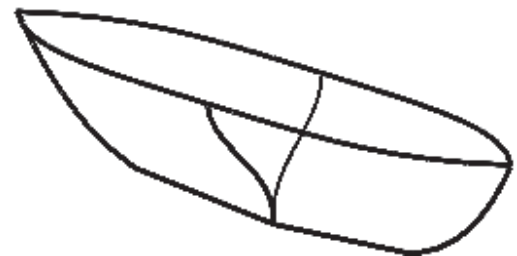


Рис. 5. Главный каркас из кривых (1)–(3)
Figure 5. The main frame from the (1)–(3) curves

Алгебраические поверхности с каркасом из параболы 4-го порядка, кривой 6-го порядка с особой точкой и параболы 4-го порядка

Пусть задан каркас из трех плоских кривых (рис. 5):

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

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

– мидель-шпангоут в форме кривой 6-го порядка в плоскости yOz :

$$z = -T\sqrt{1 \mp (y/W)^{1/3}}; \quad (2)$$

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

$$z = T \left(\frac{x^4}{L^4} - 1 \right), \quad (3)$$

тогда уравнение плоской кривой в сечении $z = \text{const}$ (рис. 4, в) будет

$$y = \pm W(z) \left(1 - \frac{x^4}{L(z)^4} \right), \quad (4)$$

где

$$L(z) = L^4 \sqrt{1 + z/T} \text{ из (3)}, \quad (5)$$

$$W(z) = -W(z^2 - T^2)^3 / T^6 \text{ из (2)}. \quad (6)$$

Подставляя значения $L(z)$ и $W(z)$ из формул (5), (6) в формулу (4), получаем уравнение искомой алгебраической бортовой поверхности:

$$y = \mp \frac{W}{T^6} (z^2 - T^2)^3 \left[1 - \frac{x^4 T}{L^4(z + T)} \right]. \quad (7)$$

Представим уравнение (7) в параметрической форме:

$$z = -uT, x = x(u, v) = vL^4 \sqrt{1 - u},$$

$$y = y(u, v) = \pm (1 - u^2)^3 (1 - v^4) W, \quad (8)$$

$$0 \leq u \leq 1, -1 \leq v \leq 1 \text{ (рис. 6, а)}.$$

Уравнение плоской кривой в сечении $x = \text{const}$ (рис. 4, а) будет по аналогии с (2)

$$z = -T(x) \sqrt{1 \mp \left(\frac{y}{W(x)} \right)^{1/3}}, \quad (9)$$

тогда

$$W(x) = W \left(1 - \frac{x^4}{L^4} \right) \text{ из (1)}, \quad (10)$$

$$T(x) = -T \left(\frac{x^4}{L^4} - 1 \right) \text{ из (3)}. \quad (11)$$

Подставляя два последних выражения в (9), находим

$$z = T \left(\frac{x^4}{L^4} - 1 \right) \sqrt{1 - \left(\frac{y}{W(1 - x^4/L^4)} \right)^{1/3}}. \quad (12)$$

Это и есть уравнение второй гидродинамической поверхности с каркасом (1)–(3). Представим уравнение поверхности (12) в параметрической форме:

$$x = uL, y = y(u, v) = vW(1 - x^4/L^4) = vW(1 - u^4),$$

$$z = z(u, v) = -T(1 - u^4) \sqrt{1 \mp v^{1/3}}, \quad (13)$$

$$-1 \leq u \leq 1, -1 \leq v \leq 1 \text{ (рис. 6, б)}.$$

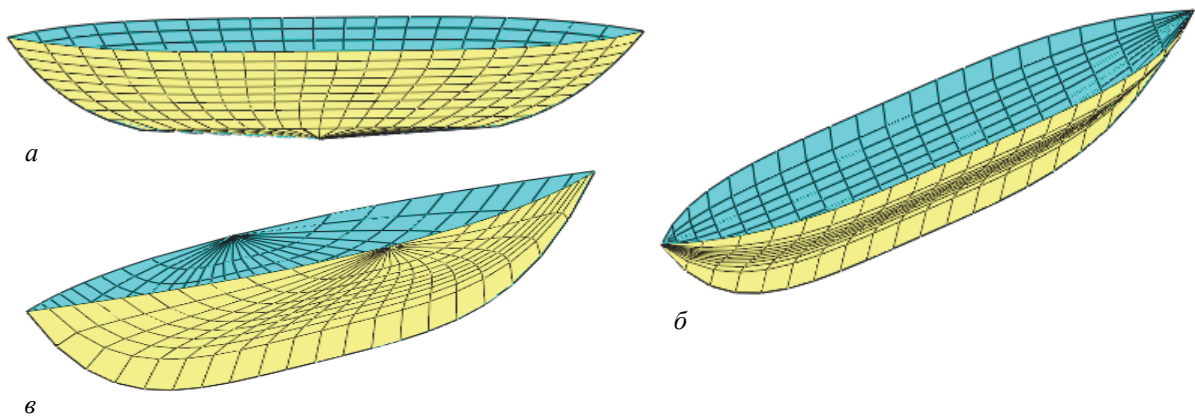


Рис. 6. Алгебраические бортовые поверхности с каркасом из параболы 4-го порядка, кривой 6-го порядка с особой точкой и параболы 4-го порядка:
 а – поверхность построена по (8); б – поверхность построена по (13); в – поверхность построена по (17)
Figure 6. The algebraic board surfaces with the frame from the 4th order parabola, the 6th order parabola with a singular point, and the 4th order parabola:
 а – a surface was built by the (8); б – a surface was built by the (13); в – a surface was built by the (17)

Уравнение плоской кривой в сечении $y = \text{const}$ (рис. 4, б) будет по аналогии с (3)

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

где

$$T(y) = T \sqrt{1 \mp (y/W)^{1/3}},$$

$$L(y) = L^4 \sqrt{(W \mp y)/W} \text{ из (1)}. \quad (15)$$

Подставляя выражения (15) в (14), находим алгебраическое уравнение третьей гидродинамической поверхности с каркасом (1)–(3):

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

Представим уравнение поверхности (16) в параметрической форме:

$$y = uW, x = x(u, v) = vL^4 \sqrt{(W \mp y)/W} = vL^4 \sqrt{1 \mp u},$$

$$z = z(u, v) = -T \sqrt{1 \mp u^{1/3}} (1 - v^4), \quad (17)$$

$$-1 \leq u \leq 1, -1 \leq v \leq 1 \text{ (рис. 6, в)}.$$

Во всех полученных формулах верхние знаки для правой части корпуса (относительно плоскости xOz), а нижние – для левой части корпуса (рис. 4, б).

На рис. 6 представлены все три гидродинамические поверхности с каркасом (1)–(3), построенные по (8), (13) и (17).

Алгебраические поверхности с каркасом из параболы 4-го порядка, пулевидной кривой и параболы 4-го порядка

Рассмотрим алгебраические поверхности с каркасом из параболы 4-го порядка (1), пулевидной кривой

$$z = \pm \frac{yT \sqrt{a^2 - W^2}}{W \sqrt{a^2 - y^2}} - T \quad (18)$$

в качестве мидель-шпангоута в плоскости yOz и параболы 4-го порядка (3) в плоскости xOz . В (18) через a обозначена произвольная константа, но $a > W$. Параметр a можно определить, задав какое-нибудь условие. Например, заранее задать значение угла наклона α_0 касательной к кривой (18) к оси Oy в точке $y = 0$, то есть $\text{tg}\alpha_0 = dz/dy$ считать известным.

Уравнение плоской кривой в сечении $z = \text{const}$ (рис. 4, в) будет

$$y = \pm W(z) \left(1 - \frac{x^4}{L(z)^4} \right), \quad (19)$$

где

$$L(z) = L^4 \sqrt{1 + z/T} \text{ из (3)}, \quad (20)$$

$$W(z) = \frac{aW(z + T)}{\sqrt{T^2(a^2 - W^2) + W^2(z + T)^2}}. \quad (21)$$

Подставляя (20) и (21) в (19), получим алгебраическое уравнение первой гидродинамической поверхности с каркасом (1), (18), (3)

$$y = \pm \frac{aW(z + T - x^4 T/L^4)}{\sqrt{T^2(a^2 - W^2) + W^2(z + T)^2}}. \quad (22)$$

Представим уравнение поверхности (22) в параметрической форме (рис. 7, а):

$$z = -uT, x = x(u, v) = vL^4 \sqrt{1 - u},$$

$$y = \pm \frac{aW(1 - u)(1 - v^4)}{\sqrt{(a^2 - W^2) + W^2(1 - u)^2}}, \quad (23)$$

$$0 \leq u \leq 1, -1 \leq v \leq 1.$$

Уравнение плоской кривой в сечении $x = \text{const}$ (рис. 4, а) будет по аналогии с (18)

$$z = \pm \frac{yT(x) \sqrt{a^2 - W(x)^2}}{W(x) \sqrt{a^2 - y^2}} - T, \quad (24)$$

где $W(x)$ находится по (10), а $T(x)$ – по (11). Подставляя эти значения (10) и (11) в (24), находим

$$z = \pm \frac{T}{W} \sqrt{a^2 - W^2 \left(1 - \frac{x^4}{L^4} \right)^2} \frac{y}{\sqrt{a^2 - y^2}} - T \left(1 - \frac{x^4}{L^4} \right). \quad (25)$$

Для удобства построения поверхности (25) на компьютере представим ее уравнение в параметрической форме (рис. 7, б):

$$x = uL, y = y(u, v) = vW(1 - x^4/L^4) = vW(1 - u^4),$$

$$z = z(u, v) =$$

$$= -T(1 - u^4) \left[1 \mp v \cdot \sqrt{\frac{a^2 - W^2(1 - u^4)^2}{a^2 - v^2 W^2(1 - u^4)^2}} \right]. \quad (26)$$

И наконец, рассмотрим кривую в сечении поверхности плоскостью $y = \text{const}$. Уравнение кривой получено в виде (14), значения $L(y)$ определяются по одной из (15), а

$$T(y) = \pm \frac{yT}{W} \frac{\sqrt{a^2 - W^2}}{\sqrt{a^2 - y^2}} - T, \quad (27)$$

где $T(y)$ это z в формуле (18), рис. 4, б. Подставляя значения $T(y)$ из (27) и $L(y)$ из (15) в уравнение кривой (14), получим уравнение третьей гидродинамической поверхности с заданным каркасом (1), (18), (3):

$$z = -T \left(\pm y \frac{\sqrt{a^2 - W^2}}{\sqrt{a^2 - y^2}} - W \right) \left[\frac{x^4}{L^4(W \mp y)} - \frac{1}{W} \right]. \quad (28)$$

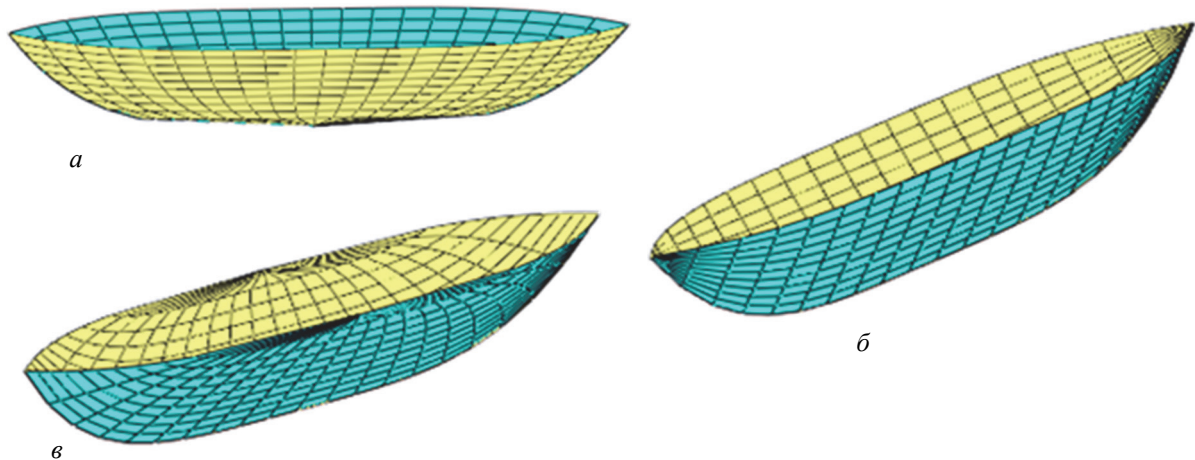


Рис. 7. Алгебраические поверхности с каркасом из параболы 4-го порядка, пулевидной кривой и параболы 4-го порядка: а – поверхность построена по (23); б – поверхность построена по (26); в – поверхность построена по (29)
Figure 7. The algebraic board surfaces with the frame from the 4th order parabola, the bullet surface, and the 4th order parabola: а – a surface was built by the (23); б – a surface was built by the (26); в – a surface was built by the (29)

Алгебраические поверхности с каркасом из парабол 4-го порядка

Пусть все три плоские кривые главного каркаса представляют собой параболы 4-го порядка, то есть в плоскости xOy лежит парабола (1), в плоскости yOz – парабола

$$z = -T \left(1 - \frac{y^4}{W^4} \right), \quad (30)$$

а в плоскости xOz парабола (3).

В сечении поверхности плоскостью $z = \text{const}$ должна лежать кривая (4), где $L(z)$ находится по (5), а

$$W(z) = W \sqrt[4]{1 + z/T}. \quad (31)$$

Уравнение поверхности (27) можно представить в параметрической форме (рис. 7, в):

$$y = y(u) = uW, \quad x = x(u, v) = vL^4 \sqrt[4]{1 \mp u},$$

$$z = z(u, v) = \left(\pm u \sqrt[4]{\frac{a^2 - W^2}{a^2 - u^2 W^2}} - 1 \right) T [1 - v^4]. \quad (29)$$

Как и в первом примере, верхние знаки для правой части корпуса (относительно плоскости xOz), а нижние – для левой части корпуса (рис. 4, а).

На рис. 7 представлены все три гидродинамические бортовые поверхности с каркасом (1), (18), (3), построенные по (23), (26) и (29).

В этом случае уравнение первой гидродинамической поверхности получаем из (4):

$$y = \pm W^4 \sqrt[4]{1 + \frac{z}{T}} \left[1 - \frac{x^4}{L^4 \left(1 + \frac{z}{T} \right)} \right]. \quad (32)$$

Запишем уравнение поверхности (32) в параметрической форме (рис. 8, а):

$$z = z(u) = -uT,$$

$$x = x(u, v) = vL^4 \sqrt[4]{1 - u},$$

$$y = y(u, v) = \pm \sqrt[4]{1 - u} (1 - v^4). \quad (33)$$

Следуя подробно рассмотренной ранее методике, запишем уравнение кривой, лежащей в

плоскости $x = \text{const}$. Это уравнение записывается на основании (30):

$$z = -T(x) \left(1 - \frac{y^4}{W(x)^4} \right), \quad (34)$$

где $W(x)$ определяется по (10), а $T(x)$ – по (11). Подставляя $W(x)$ и $T(x)$ в (34), находим

$$z = -T \left[1 - \frac{x^4}{L^4} - \frac{y^4}{W^4(1 - x^4/L^4)^3} \right]. \quad (35)$$

Для удобства компьютерного построения поверхности (34) запишем ее параметрические уравнения (рис. 8, а):

$$x = x(u) = uL,$$

$$y = y(u, v) = vW(1 - u^4),$$

$$z = z(u, v) = -T[(1 - u^4)(1 - v^4)]. \quad (36)$$

Третья поверхность с каркасом из парабол 4-го порядка формируется семейством плоских парабол, лежащих в параллельных плоскостях $y = \text{const}$, то есть ее уравнение можно записать по аналогии с уравнением (3) как

$$z = T(y) \left(\frac{x^4}{L(y)^4} - 1 \right), \quad (37)$$

$$\text{где } T(y) = T \left(1 - \frac{y^4}{W^4} \right), L(y) = L^4 \sqrt{1 \mp \frac{y}{W}}.$$

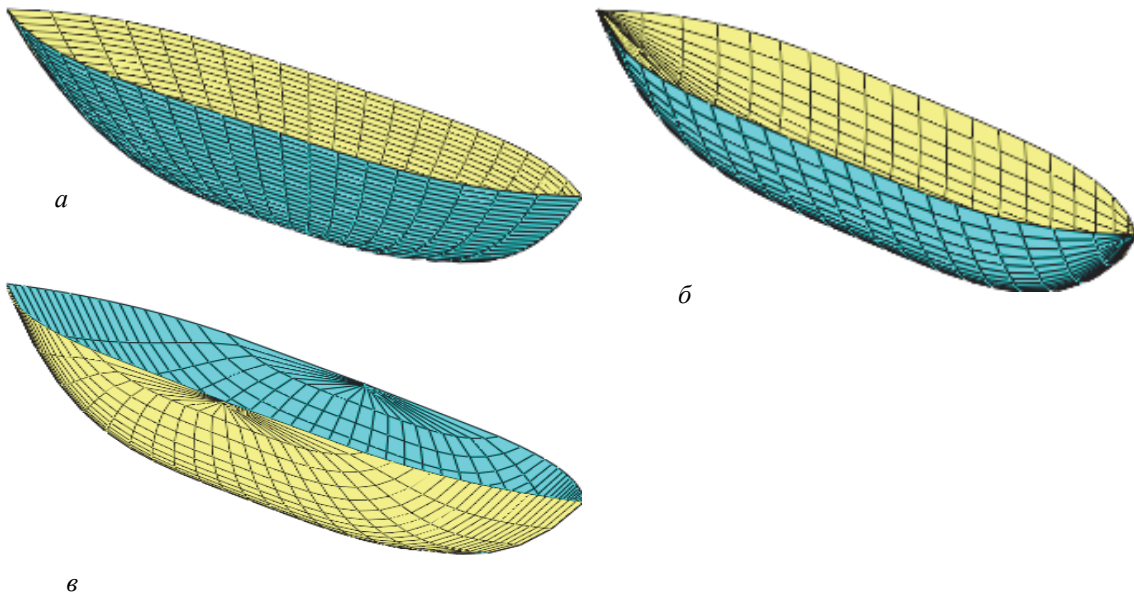


Рис. 8. Алгебраические поверхности с каркасом из парабол 4-го порядка:
 а – поверхность построена по (33); б – поверхность построена по (36); в – поверхность построена по (39)
Figure 8. The algebraic board surfaces with the frame from the 4th order parabolas:
 а – a surface was built by the (33); б – a surface was built by the (36); в – a surface was built by the (39)

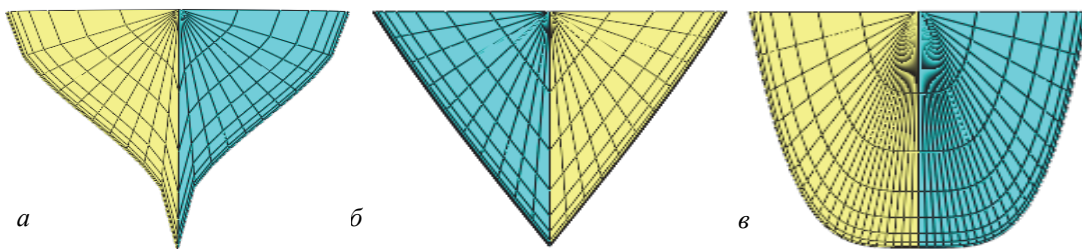


Рис. 9. Проекция рассмотренных гидродинамических поверхностей на плоскость yOz :
 а – поверхность представлена на рис. 6; б – поверхность представлена на рис. 7; в – поверхность представлена на рис. 8, б
Figure 9. The projections of the shown hydrodynamic surfaces on the yOz plane:
 а – a surface is presented on Figure 6; б – a surface is presented on Figure 7; в – a surface is presented on Figure 8, б

Подставляя последние два выражения в (37), получаем явное уравнение искомой гидродинамической поверхности:

$$z = -T \left(1 - \frac{y^4}{W^4} \right) \left(1 - \frac{x^4}{L^4 \left(1 \mp \frac{y}{W} \right)} \right). \quad (38)$$

Запишем уравнение поверхности (38) в параметрической форме (рис. 8, *в*):

$$\begin{aligned} y &= y(u) = uW, \\ x &= x(u, v) = vL^4 \sqrt[4]{1 \mp \frac{y}{W}}, \\ z &= z(u, v) = -T(1 - u^4)(1 - v^4). \end{aligned} \quad (39)$$

Все три гидродинамические бортовые поверхности с каркасом (1), (30), (3), построенные по (33), (36) и (39), показаны на рис. 8.

Для лучшего представления о формах рассмотренных корпусов судов на рис. 9 продемонстрированы проекции корпусов на плоскость yOz (рис. 4, *а*).

2. Результаты

На трех примерах показана методика определения трех троек новых гидродинамических поверхностей с одинаковым главным каркасом из заданных заранее плоских кривых (рис. 6–8). Получены их явные и параметрические уравнения. Все поверхности визуализированы с помощью компьютерного комплекса MathCad [16]. Полученные гидродинамические поверхности могут привлечь внимание судовых архитекторов при проектировании корпусов судов различного назначения, яхт и лодок. Апробированная методика может быть применена для конструирования корпусной поверхности в первом приближении. Однако, когда поверхность корпуса корабля в первом приближении выбрана, появляется масса других проблем, требующих решения. Это подробно рассмотрено на примере двух судовых корпусов в [17].

Помимо представленных в статье девяти новых гидродинамических поверхностей, известны около десятка поверхностей, предложенных Е.Я. Авдоньевым [5; 7], шесть поверхностей описаны ранее С.Н. Кривошапко [9], одна поверхность с главным батоксом в форме прямой линии изучается в [18]. Аналогичная гидродинамическая поверхность, известная в научной литературе под названием Wigley hull, имеет мидель-шпангоут и

ватерлинию в форме квадратной параболы, а главный батокс представляет собой прямую линию. Гидродинамические поверхности составляют отдельный класс [8]. В основном, как показали результаты данной статьи, они задаются в неортогональной криволинейной системе координат. Их можно отнести также к разновидностям вела-роидальных поверхностей [19].

Заключение

Предложены для рассмотрения девять новых гидродинамических поверхностей, заданных параметрическими уравнениями. Из них три образованы семейством плоских линий, параллельных ватерлинии, три – семейством линий, параллельных мидель-шпангоуту, и три – семейством линий, параллельных главному батоксу. Расширение числа предлагаемых к применению в судостроении гидродинамических поверхностей, заданных аналитически, поможет проектировщикам выбрать рациональные формы судовых корпусов.

Список литературы

1. Морозов В.Н., Цветков В.В. К вопросу выбора схемы изготовления днищевых секций корпусов // Вестник Российской академии естественных наук: сб. науч. тр. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2013. Вып. 7. С. 80–85.
2. Розинев А.Я. Технологическое совершенствование конструкции корпуса катеров и процесса их сборки // Технология машиностроения. 2020. № 5. С. 15–23.
3. Бронский А.И., Глозман М.К., Козляков В.В. Основы выбора конструкций корпуса судна. Л.: Судостроение, 1974. 250 с.
4. Doctors L.J. Optimization of marine vessels on the basis of tests on model series // J. Mar. Sci. Technol. 2020. No. 25. Pp. 887–900. <https://doi.org/10.1007/s00773-019-00687-4>
5. Авдоньев Е.Я. Аналитическое описание корпусных поверхностей // Прикладная геометрия и инженерная графика. Киев, 1972. Вып. 15. С. 156–160.
6. Авдоньев Е.Я. Математическая модель корпусной поверхности // Прикладная геометрия и инженерная графика. Киев, 1979. Вып. 28. С. 46–49.
7. Авдоньев Е.Я., Протодьяконов С.М. Исследование геометрии некоторых поверхностей высших порядков // Прикладная геометрия и инженерная графика. Киев, 1975. Вып. 20. С. 138–142.
8. Кривошапко С.Н. К вопросу об аэродинамических поверхностях, заданных алгебраическими плос-

кими кривыми // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. № 2. С. 3–4.

9. Кривошапко С.Н. Гидродинамические поверхности // Судостроение. 2021. № 3. С. 64–67. http://dx.doi.org/10.54068/00394580_2021_3_64

10. Логинов А.Ю. Графо-аналитическое решение задачи о трансформации плоских корабельных кривых // Труды ВГАВТ. Вып. 276. Н. Новгород: ВГАВТ, 1997.

11. Kwang H.K. A survey: application of geometric modeling techniques to ship modeling and design // *Inter. J. Nav. Archit. Oc. Engng.* 2010. Vol. 2. Pp. 177–184. <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0034>

12. 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. Pp. 680–696. <https://doi.org/10.17226/5870>

13. Кривошапко С.Н. Применение торсовых поверхностей в судостроении // Судостроение. 1983. № 7. С. 5–7.

14. Пятецкий В.Ю. Судна спрощених форм для обмеженого фарватеру. Київ: АН УРСР, 1962.

15. Кривошапко С.Н. О параболическом изгибании плоского металлического листа в торсовую конструкцию // *Технология машиностроения*. 2020. № 11 (221). С. 14–24.

16. Иванов В.Н., Романова В.А. Конструкционные формы пространственных конструкций. Визуализация поверхностей в системах MathCad, AutoCad: монография. М.: Изд-во АСВ, 2016. 412 с.

17. Tober H. Evaluation of drag estimation methods for ship hulls. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences, 2020. 67 p.

18. Dambrine J., Pierre M., Rousseaux G. A theoretical and numerical determination of optimal ship forms based on Michell's wave resistance // *ESAIM Control Optimisation and Calculus of Variations*. 2016. Vol. 22. No. 1. Pp. 88–111. <https://doi.org/10.1051/cocv/2014067>

19. Алборова Л.А. Возможности велароидальных оболочек // *Инженерные системы – 2020: труды научно-практической конференции с международным участием, посвященной 60-летию Российского университета дружбы народов: в 2 т. М., 2020. Т. 1. С. 59–65.*

References

1. Morozov BN, Tzvetkov VV. On the question of choice of scheme of making bottom section of hulls. *Vestnik RAEN*. 2013;(7):80–85. (In Russ.)

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

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

4. Doctors LJ. Optimization of marine vessels on the basis of tests on model series. *J. Mar. Sci Technol*. 2020;(25):887–900. <https://doi.org/10.1007/s00773-019-00687-4>

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

6. Avdonev EYa. Mathematical model of hull surface. *Prikladnaya Geometriya i Inzhenernaya Grafika*. 1979;(28):46–49. (In Russ.)

7. Avdonev EYa, Protodyakonov SM. Research of geometry of some surfaces of the highest orders. *Prikladnaya Geometriya i Inzhenernaya Grafika*. 1975;(20):138–142. (In Russ.)

8. Krivoshapko SN. On aero-hydro-dynamical surfaces given by algebraic plane curves. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2010;(2):3–4. (In Russ.)

9. Krivoshapko SN. Hydrodynamic surfaces. *Sudostroeniye*. 2021;(3):64–67. (In Russ.) http://dx.doi.org/10.54068/00394580_2021_3_64

10. Loginov AY. Graphical-and-analytical solution on transformation of plane ship curves. *Trudy VGAVT* (issue 276). Nizhny Novgorod: VGAVT Publ.; 1997. (In Russ.)

11. Kwang HK. A survey: application of geometric modeling techniques to ship modeling and design. *Inter. J. Nav. Archit. Oc. Engng.* 2010;2:177–184. <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0034>

12. 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>

13. Krivoshapko SN. Application of tangential developable surfaces in shipbuilding. *Sudostroeniye*. 1983;(7):5–7. (In Russ.)

14. Pyatetzkiy VYu. *Ships of simplified forms for river deep stream*. Kiev: AN URSR Publ.; 1962. (In Ukr.)

15. Krivoshapko SN. About parabolic bending of a flat metal sheet into a torso structure. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2020;(11(229)):14–24. (In Russ.)

16. Ivanov VN, Romanova VA. *Constructive forms of spatial structures (visualization of surfaces in MathCad, AutoCad)*. Moscow: ASV Publ.; 2016. (In Russ.)

17. Tober H. *Evaluation of drag estimation methods for ship hulls*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences; 2020.

18. Dambrine J, Pierre M, Rousseaux G. A theoretical and numerical determination of optimal ship forms based on Michell's wave resistance. *ESAIM Control Optimisation and Calculus of Variations*. 2016;22(1):88–111. <https://doi.org/10.1051/cocv/2014067>

19. Alborova LA. Opportunities of velaroidal shells. *Engineering Systems – 2020: Proceedings of the Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 60th Anniversary of the RUDN University*. 2020;1:59–65. (In Russ.)

Сведения об авторах

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. E-mail: sn_krivoshapko@mail.ru

Иванов Вячеслав Николаевич, доктор технических наук, профессор департамента строительства, Инженерная академии, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-4023-156X, Scopus Author ID: 57193384761, eLIBRARY SPIN-код: 3110-9909. E-mail: i.v.ivn@mail.ru

About the authors

Sergey N. Krivoshapko, Doctor of Technical Sciences, 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: 0000-0002-9385-369, Scopus Author ID: 6507572305; eLIBRARY SPIN-code: 2021-6966. E-mail: sn_krivoshapko@mail.ru

Vyacheslav N. Ivanov, Doctor of Technical Sciences, 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: 0000-0003-4023-156X, Scopus Author ID: 57193384761, eLIBRARY SPIN-code: 3110-9909. E-mail: i.v.ivn@mail.ru