

МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.5.024

**ГЕНЕРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА ТРАНСПОРТНОГО СУДНА**

*Бондаренко А.В., Бойко А.П., Николаенко О.С.,*

*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова*

*В статье рассмотрена задача формирования судовой поверхности в параметрической форме. Приведены основные требования к разбиению поверхности на участки. Изложены основные этапы процесса создания поверхности корпуса.*

*Ключевые слова: параметрическая поверхность, NURBS, многочлен, строевая по шпангоутам, корпус судна.*

**Введение.** Современный процесс проектирования судна невозможно представить без создания трехмерной геометрической модели поверхности корпуса. Благодаря 3D моделированию можно получить достаточно точную модель, максимально приближенную к реальному корпусу судна. Такой подход дает возможность тщательно проработать форму, получить теоретический чертеж, разработать рабочие чертежи, с высокой точностью выполнить требуемые расчеты мореходных качеств судна. Также поверхность служит основой для создания инструмента и оснастки при подготовке производства и изготовления деталей корпуса.

С развитием и внедрением в процесс проектирования методов численного моделирования движения жидкости (CFD) возникает задача выбора оптимальной формы корпуса. Для успешного решения такой задачи необходимо рассмотреть проблему не только создания качественной поверхности корпуса судна, но и ее модификации с учетом изменения параметров. Кроме того, оптимизация формы судовой поверхности требует ее параметризации, дающей возможность рассматривать альтернативные варианты, изменяя значения параметров.

**Цель данной статьи** – разработка алгоритма генерирования поверхности корпуса транспортного судна по набору основных параметров.

**Степень изученности проблемы.** Рассматриваемая в статье задача формирования параметрической судовой поверхности включает две основные подзадачи. Первая предусматривает выбор метода генерирования в зависимости от наличия исходной информации, а вторая – алгоритм преобразования при изменении некоторых параметров корпуса. Исходя из этого, следует рассмотреть основные публикации по данному направлению.

Вопросы генерирования судовой поверхности различными методами рассмотрены в большом количестве научных публикаций, например [1–4]. Путем анализа научных разработок можно выделить следующие подходы к формированию корпуса судна:

- непосредственная разработка корпуса путем манипуляции с поверхностью;
- подгонка судовой поверхности к ординатам теоретического чертежа. Ординаты теоретического чертежа могут быть получены с использованием стандартных серий судов или по прототипу;
- получение судовой поверхности по минимальному набору параметров с использованием корабельных кривых.

Первый подход достаточно трудоемкий, поскольку параметры формы корпуса определяются в результате расчетов гидростатики для уже сформированной поверхности, и поэтому конструктору для получения требуемых значений приходится итерационно менять поверхность. Как правило, этот способ используется в малом судостроении.

Второй метод менее трудоемкий, но требует наличия таблицы ординат теоретического чертежа или же самого теоретического чертежа, что на начальных этапах проектирования не всегда возможно.

Наиболее перспективным, применительно к рассматриваемой задаче, является третий метод, математическая основа которого рассматривается ниже.

Выполненный анализ публикаций по алгоритмам преобразования корпуса показывает, что для получения судовой поверхности с требуемыми параметрами, как правило, используется комбинация методов аффинного преобразования [5] и Лэкенби [6]. Значительно реже применяется метод Мура [7] и «1–Ср» [5]. Метод Лэкенби позволяет варьировать четыре параметра формы корпуса: коэффициент продольной полноты ( $C_P$ ), абсциссу центра величины ( $LCB$ ), протяженность цилиндрической вставки в носовой ( $P_F$ ) и кормовой половине судна ( $P_A$ ). Применив аффинное преобразование можно менять еще и размеры: длину, ширину, высоту борта или осадку. С учетом вышеизложенного данный метод использован для преобразования судовой поверхности.

**Изложение основного материала.** Алгоритм получения судовой поверхности корпуса по минимальному набору корабельных кривых имеет два варианта. В первом случае создается единая поверхность, но для сложных обводов ее качество будет не очень высоким. Учитывая повышенные требования CFD пакетов к качеству поверхностей, представляется целесообразнее использовать второй вариант метода, а именно создание «лоскутков» или «патчей» с указанием условий сопряжения по границам. Этот подход известен в литературе как «секционный метод» [1] или «патчей» [4]. Рассмотрим более подробно алгоритм этого метода.

Каждый «патч» математически представляется виде в NURBS поверхности, определяемой формулой [8, 9]:

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m h_{i,j} P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m h_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}, \quad (s_{k-1} \leq u \leq s_{n+1}, t_{l-1} \leq v \leq t_{m+1})$$

где  $P(u, v)$  – точка на поверхности В-сплайна в параметрических координатах  $u, v$ ;  $N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)$  – базисные функции В-сплайна,  $P_{i,j}$  – векторы задающих точек с координатами  $x, y$  и  $z$  (позиции контрольных точек);  $h_{i,j}$  – однородные координаты задающих точек (весовые коэффициенты при соответствующих контрольных точках);  $n, m$  – количество контрольных точек в направлении  $u, v$ ;  $k, l$  – степень кривой в направлении  $u, v$ .

Для сопряжения участков используются, как правило, три граничных условия: сопряжение по положению  $G0$ , по касательной  $G1$  и по кривизне  $G2$ .

Каждый из этих видов сопряжения применяется в зависимости от топологии судовой поверхности. Так для получения линии слома необходимо использовать тип  $G0$ , а для плавного перехода из одного участка в другой –  $G1$  или  $G2$ .

При формировании границ участков (патчей) необходимо, чтобы система базовых линий образовывала замкнутые участки, имеющие четыре граничных линии (одна из граничных линий может вырождаться в точку). Деление на участки проводится так, чтобы внутри участка не было больших углов наклона и резкого изменения кривизны [2]. Поверхность судна можно, например, разбить на районы кормовой и носовой оконечностей, кормовой и носовой скул, плоскую часть днища, цилиндрическую вставку и т.д. При разбиении необходимо учитывать и ряд математических особенностей NURBS кривых и поверхностей. В частности, необходимо обязательно выделять в отдельные участки поверхности между линиями сломов, участки плоского борта, плоского днища и участки линейчатых поверхностей. Также необходимо избегать разбиения гладких поверхностей на отдельные участки. Стыковка таких участков, как правило, производится только по первой производной и не дает необходимой гладкости.

Исходя из вышеуказанного, алгоритм построения судовой поверхности предполагает использование следующих базовых линий: строевой по шпангоутам (СПШ), конструктивной ватерлинии (КВЛ), линии плоского днища (FOB), линии плоского борта (FOS), верхней палубы, мидель-шпангоута, транца, бульба, промежуточных шпангоутов, диаметрального батокса (рис. 1).

Проблемным вопросом данного метода является формирование граничных линий при отсутствии теоретического чертежа. Авторами предлагается использовать следующий алгоритм.

На первом этапе определяется уравнение строевой по шпангоутам при неизвестных коэффициентах  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ .

$$A'(x') = a_0 + a_1x' + a_2x'^2 + a_3x'^3 + a_4x'^4 + a_5x'^5 + a_6x'^6 + a_7x'^7,$$

где  $A'(x) = \frac{A}{BTC_M}$  – площадь шпангоута;  $x' = \frac{x}{L}$  – положение шпангоута по

длине судна;  $LCB' = \frac{LCB}{L}$  – абсцисса центра величины, %.

Исходными данными для определения неизвестных величин  $a_i$  являются: коэффициент продольной полноты  $C_P$ , абсцисса центра величины  $LCB'$ , площадь транца  $A'_{tr}$ , площадь бульба  $A'_b$ ,  $p_A$  и  $p_F$  конечные точки цилиндрической вставки.

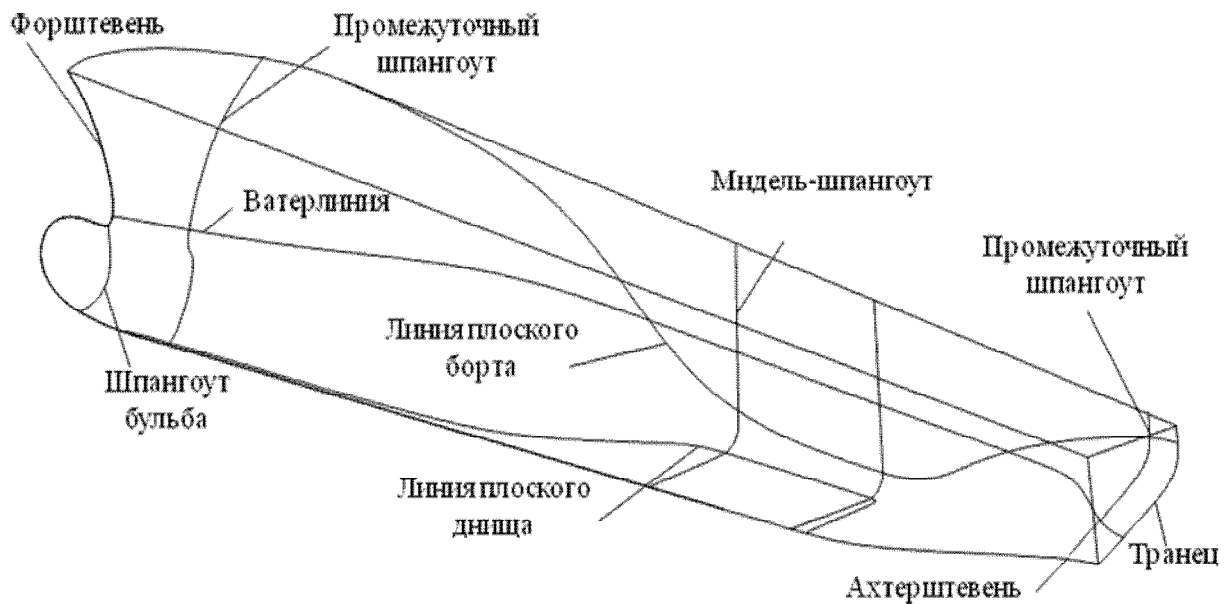


Рисунок 1 – Основные линии для построения поверхности корпуса

Значения коэффициентов многочлена определяются из решения системы уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ p_A & p_A^2 & p_A^3 & p_A^4 & p_A^5 & p_A^6 & p_A^7 & a_1 \\ p_F & p_F^2 & p_F^3 & p_F^4 & p_F^5 & p_F^6 & p_F^7 & a_2 \\ 1 & 2p_A & 3p_A^2 & 4p_A^3 & 5p_A^4 & 6p_A^5 & 7p_A^6 & a_3 \\ 1 & 2p_F & 3p_F^2 & 4p_F^3 & 5p_F^4 & 6p_F^5 & 7p_F^6 & a_4 \\ 1/2 & 1/3 & 1/4 & 1/5 & 1/6 & 1/7 & 1/8 & a_5 \\ 1/3 & 1/4 & 1/5 & 1/6 & 1/7 & 1/8 & 1/9 & a_6 \\ & & & & & & & a_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A'_{tr} \\ A'_b - A'_{tr} \\ 1 - A'_{tr} \\ 0 \\ 0 \\ C_P - A'_{tr} \\ (0,5 - LCB'/100)C_P - 0,5A'_{tr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Далее аналогичным образом определяется уравнение конструктивной ватерлинии

Для описания КВЛ также применяется многочлен пятой (2) или шестой (3) степени

$$y'(x') = a_0 + a_1x' + a_2x'^2 + a_3x'^3 + a_4x'^4 + a_5x'^5, \quad (2)$$

$$y'(x') = a_0 + a_1x' + a_2x'^2 + a_3x'^3 + a_4x'^4 + a_5x'^5 + a_6x'^6 \quad (3)$$

Неизвестные коэффициенты в выражениях (2)–(3) определяются из решения системы уравнений аналогичной (1). При этом коэффициент продольной полноты  $C_P$  должен быть заменен на коэффициент полноты площади ватерлинии  $C_{WP}$ , абсцисса центра величины  $LCB$  на абсциссу центра тяжести ватерлинии  $LCF$ , площадь транца  $A_{tr}$  на относительную полуширину транца  $y_{tr} = y/B$ , площадь бульба  $A_b$  на 0.

Таким образом, система граничных условий для определения коэффициентов будет иметь вид:

$$1. \quad y'(0) = y_{tr} \rightarrow a_0 = y_{tr},$$

$$2. \quad y'(1) = 0$$

$$3. \quad y'(0,5) = 1$$

$$4. \quad \left. \frac{dy'}{dx} \right|_{0,5} = 0$$

$$5. \quad \int_0^1 y'(x') dx' = C_{WP}$$

$$6. \quad \int_0^1 y'(x') x dx' = C_{WP} \left( 0,5 - \frac{LCF}{100} \right)$$

При использовании полинома шестой степени (3) и более в качестве дополнительного условия может служить

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=1} = \operatorname{tg} \frac{\psi}{2},$$

где  $\psi$  – угол входа КВЛ.

При наличии цилиндрической вставки для описания КВЛ применяется полином 7-ой степени. Дополнительными условиями служат точки начала и окончания цилиндрической вставки  $p_F, p_A$ .

Обычно, при оптимизации формы корпуса, надводная часть не рассматривается. По мнению авторов это не совсем правильно, поскольку форма надводной части влияет на ходкость судна на волнении, вместимость, качку, остойчивость.

Поэтому целесообразнее сразу оптимизировать всю форму судовой поверхности. При этом можно не моделировать бак или ют, так как их можно затем просто воссоздать для окончательного варианта при разработке общего расположения, а неучет бака или юта скажется на мореходных качествах с ошибкой в безопасную сторону.

Мидель-шпангоут транспортного судна (рис. 2) удобнее построить с применением прямых и дуги окружности, радиус которой определяется по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{Bd(1 - C_M) - 0,5h(B - 2b)}{K}},$$

где  $K = \sqrt{\frac{4(B - 2b)^2}{h^2} - 1,5711}$ .

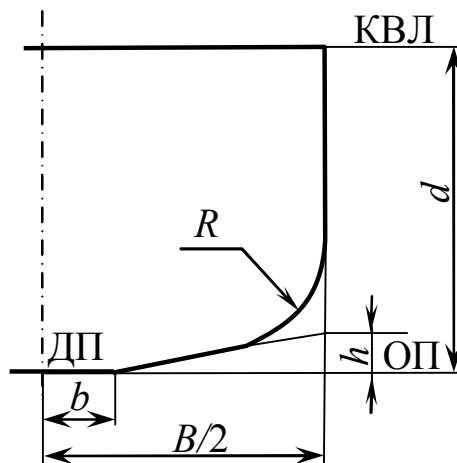


Рисунок 2 – Построение мидель-шпангоута

Для описания шпангоутов использовался следующий подход:

1. Для шпангоутов с площадью не меньше 0,75 используется парабола 4-й степени  $y = \lambda z + az^2 + bz^3 + cz^4$ .

2. Шпангоуты с площадью меньше 0,667 описываются уравнением гиперболы в виде

$$y = az + b - \frac{d}{z + c}.$$

3. Для шпангоутов с площадью от 0,667 до 0,75 можно использовать как параболу, так и гиперболу. В качестве граничной рекомендуется линия с площадью около 0,72.

Для определения неизвестных коэффициентов многочлена требуется четыре условия. Два из них получают согласно выбранным кривым КВЛ и СПШ, откуда

$$y_1(1) = y_{\text{КВЛ}}(x); \int_0^1 y_1(z) dz = m.$$

где  $m$  – площадь соответствующего шпангоута;  $y_{\text{КВЛ}}$  – полуширина шпангоута.

Два других коэффициента находят по заданному углу килеватости  $\lambda$  и развалу борта шпангоута  $f$

$$\frac{dy_1(0)}{dz} = \lambda; \frac{dy_1(1)}{dz} = f.$$

Для параболы четвертой степени

$$\begin{aligned} a &= \frac{3}{2}f - \frac{9}{2}\lambda + 30m - 12 \\ b &= -4f + 6\lambda - 60m + 28. \\ c &= \frac{5}{2}f - \frac{5}{2}\lambda + 30m + 15 \end{aligned}$$

Для гиперболы будем иметь

$$\begin{aligned} a &= f - c(1 - f) \\ b &= (1 - f)(1 + c)^2. \\ d &= (1 - f)(1 + c)^2 c \end{aligned}$$

Значения этих коэффициентов используются для определения  $c$ , но сначала рассчитывается  $m$ :

$$m = \frac{a}{2} + b - d \ln\left(\frac{1+c}{c}\right).$$

или подставляя значения  $a$ ,  $b$  и  $d$

$$m = \frac{f}{2} + (1 - f)(1 + c)^2 \left[ 1 - \frac{c}{2(1 + c)^2} - c \ln\left(\frac{1 + c}{c}\right) \right]. \quad (4)$$

Коэффициент  $c$  для различных значений  $m$  и  $f$  определяются из решения уравнения (4).

Линии верхней палубы, FOB, FOS описываются аналогично.

После получения коэффициентов уравнений базовых линий выполняется их построение в какой-либо CAD системе. В данной работе для этого использована среда T-Flex. Затем, используя доступные в данной системе средства, формируется судовая поверхность в следующей последовательности:

1. Сначала создаются поверхности плоского борта и плоского днища, которые, в конечном счете, определяют граничные условия (позиция, точка касания, кривизна) с другими поверхностями.

2. Затем формируются внешние лоскуты поверхности, используя полученные граничные условия, чтобы учесть непрерывность лоскутков и получить плавность сопряжений.

3. Выполняется анализ качества полученных поверхностей (гауссова кривизна, линии кривизны и т.д.).

4. Если качество поверхностей не достаточное, то необходимо улучшить гладкость требуемых ребер и внутренних кривых, возвратится к шагу (1) и повторить генерирование поверхностей.

После получения поверхности корпуса судна с заданными параметрами, при решении задачи оптимизации формы корпуса, нет необходимости каждый раз пересчитывать значения коэффициентов уравнений базовых линий. В этом случае целесообразнее применить метод Лэкенби и аффинное преобразование корпуса судна, что позволяет значительно сократить время расчетов.

**Вывод.** Используя предложенный алгоритм, можно получить достаточно качественную поверхность корпуса судна любой сложности, которую в дальнейшем можно применять для расчетов сопротивления в CFD пакетах, гидростатики – в «Maxsurf» и других САД системах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашик В. В. Методы построения и согласования судовой поверхности с помощью ЭВМ [Текст] / В. В. Ашик, А. А. Богданов, И. Б. Мараева, А. Н. Шебалов. – Л.: Судостроение, 1978. – 80 с.

2. Попов Е. В. Построение поверхности судового корпуса с использованием генетического алгоритма [Текст] / Е.В. Попов, А.В. Рекшинский // Вестник ИжГТУ. – 2007. – № 3(35). – С. 116–120.

3. Bole M. Integrating Parametric Hull Generation into Early Stage Design [Text] / M. Bole, B.-S. Lee // Ship Technology Research. – 2006. – Vol. 53(3). – P. 115–137.

4. Nowacki H. Computational geometry for ships [Text]/ H. Nowacki, M.I.G. Bloor, B. Oleksiewicz. – Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1995. – 252 p.

5. Versluis A. Computer Aided Design of Shipform by Affine Transformation [Text] / A. Versluis // International Shipbuilding Progress. – 1977. – Vol. 24. – № 274. – P. 147–160.

6. Lackenby H. On the Systematic Geometrical Variation of Ship Forms [Text] / H. Lackenby // Trans. INA. – 1950. – Vol. 92. – P. 289–315.

7. Moor D. The BSRA Methodical Series – An Overall Presentation [Text] / D. Moor, M. Parker, R. Pattulo // Transactions of RINA. – 1961. – Vol. 103. – P. 329–419.

8. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) [Текст] / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.

9. Роджерс А. Математические основы машинной графики [Текст] / А. Роджерс. – М.: Мир, 2001. – 604 с.



**Бондаренко О.В., Бойко А.П., Ніколаєнко О.С. ГЕНЕРУВАННЯ ПОВЕРХНІ КОРПУСА ТРАНСПОРТНОГО СУДНА**

*У статті розглянуто задачу формування суднової поверхні в параметричній формі. Наведено основні вимоги до поділу поверхні на ділянки. Викладено основні етапи процесу створення поверхні корпусу.*

*Ключові слова: параметрична поверхня, NURBS, багаточлен, побудовна по шпангоутах, корпус судна.*

**Bondarenko A.V., Boiko A.P., Nikolayenko O.S. GENERATION OF CARGO SHIP HULL SURFACE**

*The task of forming ship surface in parametric shape is considered. Basic requirements to surface sectionalization are given. Main stages in the process of generating the hull surface are stated.*

*Keywords: parametric surface, NURBS, polynomial, section area curve, ship hull.*