

УДК 629.5.01

**Д.Ю. Несин, ведущий инженер**

ПАО «ЦКБ «Коралл»

ул. Ретина 1, г. Севастополь, Украина, 99028

E-mail: office@cdbcoral.com

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ПЕРЕСТРОЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЧЕРТЕЖА СУДНА-ПРОТОТИПА НА ОСНОВАНИИ СТРОЕВОЙ ПО ШПАНГОУТАМ ПРОЕКТА**

*Проанализированы особенности автоматизации процесса генерации судовой поверхности и теоретического чертежа. Рассматривается перестроение теоретического чертежа судна-прототипа на основании строевой по шпангоутам проектируемого судна. Предлагается математическая модель для выполнения данного перестроения.*

**Ключевые слова:** теоретический чертеж, проектирование обводов судна, коэффициент полноты судна, абсцисса центра величины, строевая по шпангоутам.

**Постановка проблемы.** В судостроении ЭВМ стала неотъемлемым элементом процесса проектирования как средство, способное облегчить его наиболее трудоемкие этапы. Одна из наиболее интересных задач, которую позволяет решить компьютер, – проектирование корпуса судна (создание теоретического чертежа, таблицы ординат). Теоретический чертеж, изображает поверхность судна и строится на основании главных размерений, а также целого ряда характеристик формы. Особое значение при этом имеют коэффициенты полноты и прежде всего коэффициент полноты водоизмещения  $C_B$ , или коэффициент общей полноты, коэффициент полноты грузовой (конструктивной) ватерлинии  $C_W$  и коэффициент полноты шпангоута наибольшей площади  $C_M$ . К этим трем коэффициентам добавляются зависящие от них коэффициент продольной остроты  $C_P = C_B/C_M$  и коэффициент вертикальной полноты  $C_{VP} = C_B/C_W$ , а также многие другие, характеризующие форму судна. Строевая по шпангоутам, наряду с характерными очертаниями кормовых и носовых ветвей батоксов, является важным критерием при проектировании обводов, так как определяет эффективную длину корпуса [1, 2].

В основе любой системы проектирования корпуса судна лежит математическая модель его поверхности. Существующие в настоящее время методы построения судовой поверхности можно подразделить на две группы [3]:

- методы проектирования судовой поверхности;
- методы согласования теоретического чертежа при технологической подготовке производства.

Методы первой группы, в свою очередь, подразделяются по характеру входной информации на следующие:

- построение судовой поверхности по заданным главным размерениям и характеристикам формы;
- построение теоретического чертежа путем перестроения чертежа-прототипа;
- построение судовой поверхности по заданному эскизу теоретического чертежа.

Информацией для методов второй группы является согласованный в масштабе теоретический чертеж корпуса судна.

Несмотря на большое количество публикаций связанных с различными способами получения теоретических чертежей [3] их разработка без согласованной и сглаженной математической модели судовой поверхности, которая позволяла бы получить в заданном формате поверхность, отвечающую конкретным техническим условиям/требованиям, в настоящее время, даже при использовании таких мощных систем САПР как Triboп или Foran и им подобным, имеет низкую степень автоматизации и сравнительно высокую трудоемкость [4]. Причиной этого является тот факт, что теоретические чертежи, хотя и с использованием специальной визуальной среды, строятся вручную, САПР программы лишь автоматизирует процесс согласования и сглаживания. Доступных же универсальных (описывающих судовые обводы любого типа) математических моделей судовой поверхности просто не существует [3]. Поэтому до сих пор актуальным является построение теоретического чертежа путем перестроения чертежа-прототипа, а также совершенствование методов такого построения.

Существуют три основных способа перестроения теоретического чертежа-прототипа [1, 2]: аффинное перестроение чертежа прототипа; интерполяционный метод построения; перестроение чертежа прототипа на основании строевой по шпангоутам проекта.

Недостатки этих способов следующие:

- аффинное перестроение: невозможно получить судовую поверхность, отличающуюся от прототипа коэффициентами полноты и относительным положением центра величины;
- интерполяционный метод: высокая трудоемкость при сравнительно низкой точности, требуется несколько приближений [1];

– перестроение чертежа прототипа на основании строевой: в доступных источниках [1, 3] метод представлен для «ручного» применения, что делает его приближенным и трудоемким. Информация, позволяющая использовать метод при автоматизированном проектировании на компьютере, другими словами математические модели, адаптирующие метод для расчетов на компьютере в доступных источниках, отсутствуют.

**Цель настоящей работы.** Разработать математическую модель и алгоритм построения теоретического чертежа, который позволяет преобразовать теоретический чертеж судна-прототипа к заданным характеристикам проектируемого судна (главным размерениям, коэффициенту продольной остроты  $C_p$ , абсциссе центра величины  $x_C$ ) пересчетом элементов строевой по шпангоутам судна-прототипа.

**Изложение основного материала.** Для строевой по шпангоутам (показанной на рисунке 1) теоретического чертежа судна-прототипа, размеры которого аффинно-преобразованы к размерам проекта справедлива система уравнений (1):

$$\left. \begin{aligned} l_R + l_{PMB} + l_E &= L \\ C_{PR}x_{CR}l_R + x_{CPMB}l_{PMB} + C_{PE}x_{CE}l_E &= C_p x_C L \\ C_{PR}l_R + l_{PMB} + C_{PE}l_E &= C_p L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) приняты следующие обозначения:

$l_R, l_{PMB}, l_E$  – длина кормового заострения, цилиндрической вставки и носового заострения соответственно;

$C_{PR}, C_{PE}$  – коэффициенты продольной полноты кормового и носового заострения, соответственно;

$x_{CR}, x_{PMB}, x_{CE}$  – абсциссы центра величины в системе координат относительно кормового перпендикуляра судна носового заострения, цилиндрической вставки и кормового заострения, соответственно;

$C_p, x_C, L$  – коэффициент продольной полноты корпуса проектируемого судна, абсцисса центра величины проектируемого судна (в системе координат относительно кормового перпендикуляра), длина проектируемого судна по расчетную ватерлинию.

В безразмерной форме система уравнений (1) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{l}_R + \bar{l}_{PMB} + \bar{l}_E &= 1 \\ C_{PR} \frac{x_{CR}}{L} \bar{l}_R + \frac{x_{CPMB}}{L} \bar{l}_{PMB} + C_{PE} \frac{x_{CE}}{L} \bar{l}_E &= C_p \frac{x_C}{L} \\ C_{PR} \bar{l}_R + \bar{l}_{PMB} + C_{PE} \bar{l}_E &= C_p \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $\bar{l}_R = \frac{l_R}{L}$ ;  $\bar{l}_{PMB} = \frac{l_{PMB}}{L}$ ;  $\bar{l}_E = \frac{l_E}{L}$ .

С учетом того, что для любого конкретного чертежа судна-прототипа коэффициенты продольной полноты оконечностей  $C_{PR}, C_{PE}$  и относительные абсциссы  $x_{CR}, x_{PMB}, x_{CE}$  постоянны и изначально известны, при задаваемых (т.е. проектных)  $C_p$  и  $x_C$ , система (2) становится системой уравнений с тремя неизвестными  $\bar{l}_R, \bar{l}_{PMB}, \bar{l}_E$ . В этом случае задача перестроения теоретического чертежа проектируемого

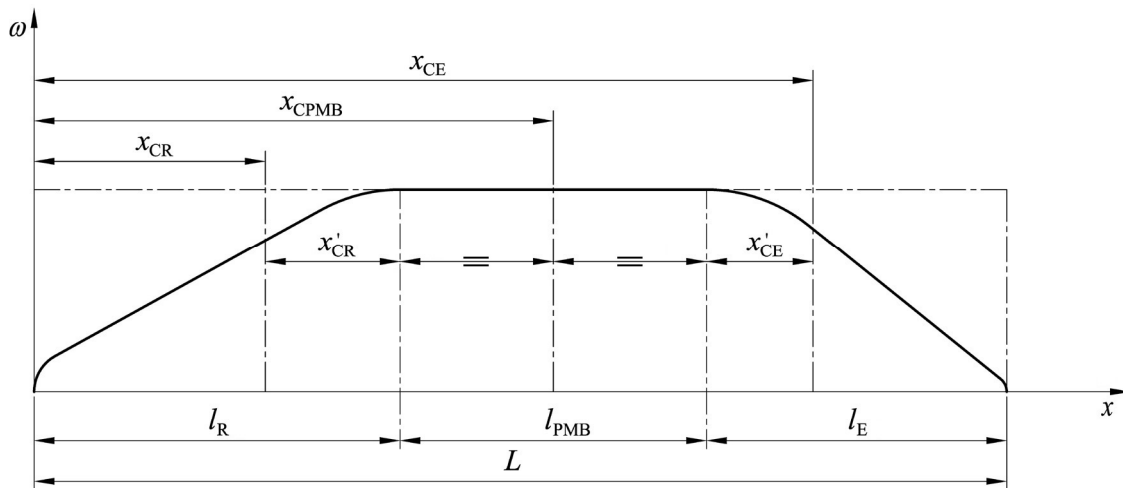


Рисунок 1 – Строевая по шпангоутам

судна с чертежа судна-прототипа сводится к такому изменению относительных длин  $\bar{l}_R, \bar{l}_{PMB}, \bar{l}_E$ , при котором будут получены заданные проектантом  $C_P$  и  $x_C$ . Для решения данной задачи следует решить (2) относительно неизвестных  $\bar{l}_R, \bar{l}_{PMB}, \bar{l}_E$ .

Для большего удобства расчетов перейдем от традиционной системы координат (отсчет от кормового перпендикуляра) к системе, в которой начало координат находится на середине цилиндрической вставки, положительное направление оси абсцисс в нос. В новой системе координат получаем:

$$\left. \begin{aligned} x'_{CR} &= -x_{CR} - 0,5l_{PMB} \\ x'_{CPMB} &= 0 \\ x'_{CE} &= x_{CE} - 0,5l_{PMB} \\ x'_C &= x_C - l_R - 0,5l_{PMB} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Выразим также относительные абсциссы центров величины через искомые  $\bar{l}_R$  и  $\bar{l}_E$  как

$$\frac{x'_{CR}}{L} = k'_{CR} \bar{l}_R, \quad (4)$$

$$\frac{x'_{CE}}{L} = k'_{CE} \bar{l}_E. \quad (5)$$

После подстановки (3) – (5) в (2) получим:

$$\left. \begin{aligned} \bar{l}_R + \bar{l}_{PMB} + \bar{l}_E &= 1 \\ -C_{PR} (k'_{CR} \bar{l}_R + 0,5\bar{l}_{PMB}) \bar{l}_R + C_{PE} (k'_{CE} \bar{l}_E + 0,5\bar{l}_{PMB}) \bar{l}_E &= C_P \left( \frac{x_C}{L} - \bar{l}_R - 0,5\bar{l}_{PMB} \right) \\ C_{PR} \bar{l}_R + \bar{l}_{PMB} + C_{PE} \bar{l}_E &= C_P \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Если выразить  $\bar{l}_R$  и  $\bar{l}_E$  через  $\bar{l}_{PMB}$  как

$$\bar{l}_R = 1 - \bar{l}_{PMB}(1 + A) - B, \quad (7)$$

$$\bar{l}_E = A\bar{l}_{PMB} + B, \quad (8)$$

мы можем исключить их из системы (6). В (7) и (8) принято

$$A = \frac{C_{PR} - 1}{C_{PE} - C_{PR}},$$

$$B = \frac{C_P - C_{PR}}{C_{PE} - C_{PR}}.$$

Подставив (7) и (8) в (6), получим квадратное уравнение относительно  $\bar{l}_{PMB}$

$$\begin{aligned} &\{C_{PR}(1+A)[0,5 - k'_{CR}(1+A)] + C_{PE}A(k'_{CE}A + 0,5)\} \bar{l}_{PMB}^2 + \\ &+ \{C_{PR}[2k'_{CR}(1+A)(1-B) - 0,5(1-B)] + C_{PE}B(2k'_{CE}A + 0,5) + C_P[0,5 - (1+A)]\} \bar{l}_{PMB} - \\ &- \left\{ C_{PR} k'_{CR} (1-B)^2 - C_{PE} k'_{CE} B^2 + C_P \left[ B + \frac{x_C}{L} - 1 \right] \right\} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Физический смысл имеет только корень

$$\bar{l}_{PMB} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} a &= C_{PR}(1+A)[0,5 - k'_{CR}(1+A)] + C_{PE}A(k'_{CE}A + 0,5); \\ b &= C_{PR}[2k'_{CR}(1+A)(1-B) - 0,5(1-B)] + C_{PE}B(2k'_{CE}A + 0,5) + C_P[0,5 - (1+A)]; \\ c &= -C_{PR} k'_{CR} (1-B)^2 + C_{PE} k'_{CE} B^2 - C_P \left[ B + \frac{x_C}{L} - 1 \right]. \end{aligned}$$

Несмотря на кажущуюся громоздкость нахождения элементов по формулам (7) – (9) намного проще, чем при помощи графических построений, описанных в [1] и других источниках. Еще одно преимущество разработанной модели заключается в том, что она легко поддается алгоритмизации или

при простом применении электронных таблиц. Следует отметить, что нахождение корней уравнения (9) возможно только при условии выполнения неравенства  $C_{PE} - C_{PR} \neq 0$ . В противном случае, если  $C_{PE} = C_{PR} = C'_P$ , то

$$\bar{l}_{PMB} = \frac{C_P - C'_P}{1 - C'_P} = const. \tag{11}$$

С учетом (11) (6) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{l}_R + \bar{l}_{PMB} + \bar{l}_E &= 1 \\ C'_P \left[ (k'_{CE} \bar{l}_E + 0,5 \bar{l}_{PMB}) \bar{l}_E - (k'_{CR} \bar{l}_R + 0,5 \bar{l}_{PMB}) \bar{l}_R \right] &= C_P \left( \frac{x_C}{L} - \bar{l}_R - 0,5 \bar{l}_{PMB} \right) \\ C'_P (\bar{l}_R + \bar{l}_E) + \bar{l}_{PMB} &= C_P \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

Тогда данную систему можно свести к квадратному уравнению относительно  $\bar{l}_E$ , т.е.

$$C'_P (k'_{CE} - k'_{CR}) \bar{l}_E^2 + C'_P \left[ 2k'_{CR} (1 - \bar{l}_{PMB}) + \bar{l}_{PMB} - \frac{C_P}{C'_P} \right] \bar{l}_E - k'_{CR} (1 - \bar{l}_{PMB})^2 + 0,5 \bar{l}_{PMB}^2 - 0,5 \bar{l}_{PMB} - C_P \left( \frac{x_C}{L} + 0,5 \bar{l}_{PMB} - 1 \right) = 0 \tag{13}$$

$$\bar{l}_E = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \tag{14}$$

где  $a = C'_P (k'_{CE} - k'_{CR})$ ;

$$b = C'_P \left[ 2k'_{CR} (1 - \bar{l}_{PMB}) + \bar{l}_{PMB} - \frac{C_P}{C'_P} \right];$$

$$c = -k'_{CR} (1 - \bar{l}_{PMB})^2 + 0,5 \bar{l}_{PMB}^2 - 0,5 \bar{l}_{PMB} - C_P \left( \frac{x_C}{L} + 0,5 \bar{l}_{PMB} - 1 \right).$$

Алгоритм определения параметров формы представлен в виде блок-схемы на рисунке 2. Подразумевается, что разработанная математическая модель используется для внутренней процедуры изменения параметров формы внутри программы для генерации поверхности судна.

**Выводы.** При проектировании обводов шпангоутов и ватерлиний конструктор преследует цель обеспечения самого благоприятного обтекания корпуса, необходимой остойчивости формы и эстетического внешнего вида судна. Абсолютное выполнение этих условий выражается в точном совпадении предварительно определенного центра тяжести с центром величины подводного объема корпуса по длине, а также в достижении такого водоизмещения, которое было получено из расчета массовой нагрузки. Полученная математическая модель позволяет, при наличии теоретического чертежа судна-прототипа, решить следующий ряд практических задач

- 1) получение нового теоретического чертежа с заданными  $C_P, x_C, L$ ;
- 2) определение пределов применимости конкретного теоретического чертежа судна-прототипа при различных требованиях к характеристикам его формы; например, можно определить диапазон изменения  $C_P$  исходя из условий:

$$\begin{aligned} [\bar{l}_R]_{\min} &\leq \bar{l}_R \leq [\bar{l}_R]_{\max}; \\ [\bar{l}_{PMB}]_{\min} &\leq \bar{l}_{PMB} \leq [\bar{l}_{PMB}]_{\max}; \\ [\bar{l}_E]_{\min} &\leq \bar{l}_E \leq [\bar{l}_E]_{\max}; \end{aligned}$$

- 3) корректировка существующего теоретического чертежа после уточнения весовой нагрузки судна;

- 4) использование в качестве основы для внутренней процедуры изменения параметров формы внутри программы для генерации судовой поверхности судна.

Перспективой дальнейших исследований является разработка более общей математической модели, описывающей судовую поверхность, в которой разработанная модель будет использована в качестве средства изменения распределения водоизмещения по длине судна.

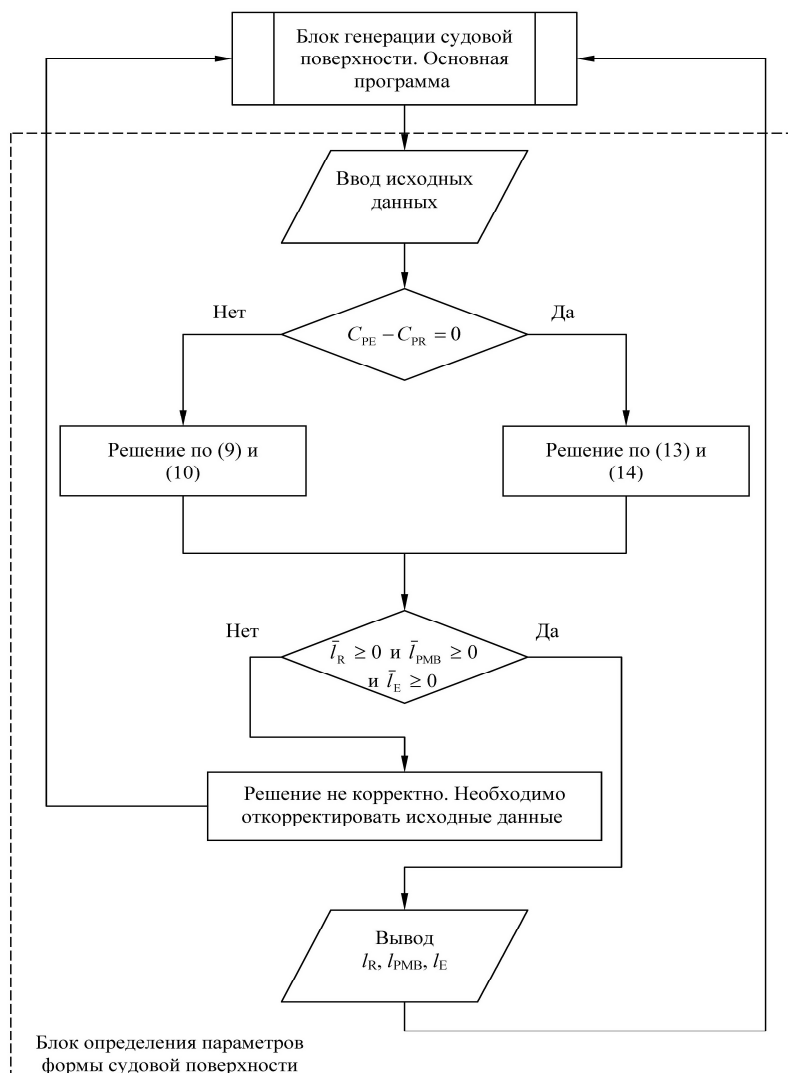


Рисунок 2 – Блок-схема блока определения параметров формы судовой поверхности

**Библиографический список использованной литературы**

1. Ашик В.В. Проектирование судов / В.В. Ашик — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Судостроение, 1985. — 318 с.
2. Ногид Л.М. Проектирование морских судов/ Л.М. Ногид — Л.: Судостроение, 1976. — 208 с.
3. Ашик В.В. Методы построения и согласования судовой поверхности с помощью ЭВМ / В.В. Ашик, А.А. Богданов, И.Б. Мараева, А.Н. Шебалов; под ред. В.В. Ашика. — Л.: Судостроение, 1978. — 79 с.
4. Tribon M3 User's Guide. Lines. — L.: AVEVA AB, 2005 — 652 p.

Поступила в редакцию 01.10.2013 г.

**Несін Д.Ю. Математична модель і алгоритм для перестроювання теоретичного креслення судна-прототипу на підставі стройовий по шпангоутів проекту**

Проаналізовано особливості автоматизації процесу генерації суднової поверхні і теоретичного креслення. Розглядається перестроювання теоретичного креслення судна-прототипу на підставі стройової по шпангоутам проектування судна. Пропонується математична модель для виконання цього перестроювання.

**Ключові слова:** теоретичний креслення, проектування обводів судна, коефіцієнт повноти судна, абсциса центру величини, стройова по шпангоутам.

**Nesin D.J. Mathematical model and the algorithm for evolution of the lines drawing of the vessel-prototype on project's A-curve**

The features of automating the process of generation of the ship surface and lines drawing. The lines drawing of a vessel prototype on project's A-curve of a projected vessel is have been studied. The mathematical model for performance of this evolution is offered.

**Keywords:** lines drawing, hull form design, hull basic coefficient, center of buoyancy abscissa, A-curve.