

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА СУДНА ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

Проанализирован современный уровень развития вопроса параметрического управления судовыми поверхностями, обоснована возможность применения аналитических моделей для описания поверхности корпуса судов ледового плавания (СЛП). Приведено описание разработанной аналитической модели корпуса СЛП, и выполнено сравнение обводов, получаемых на основании модели, с обводами реальных судов. Результаты сопоставления подтвердили возможность использования модели. Приведен пример оптимизации обводов научно-экспедиционного судна по критерию ледового сопротивления в сплошных льдах при сохранении заданных гидростатических параметров. Показаны перспективы использования параметрически управляемых моделей поверхности при проектировании СЛП на ранних стадиях.

Ключевые слова: *поверхность судового корпуса; аналитическая модель корпуса; носовая оконечность; кормовая оконечность; ледокольная форма корпуса; судно ледового плавания; оптимизация судов.*

ВВЕДЕНИЕ

Решение различных задач концептуального и эскизного проектирования судов ледового плавания (СЛП), а также оптимизация их характеристик невозможны без использования модели поверхности корпуса. Для решения обычных проектных задач и выполнения типичных судостроительных расчетов могут успешно применяться традиционные NURBS-модели [11] поверхности, реализованные во всех САПР-системах и ориентированные на ручное управление контрольными точками. Однако для проработки большого количества вариантов проектируемого судна и для оптимизации характеристик проекта необходимо использование параметрически управляемых моделей поверхности. В настоящее время такие модели широко применяются как при численной (CFD) оптимизации обводов судна [10], так и при концептуальном проектировании судов [2].

Идея параметрически управляемых поверхностей изначально развивалась в аналитических методах описания судовой поверхности в период до 1960–70-х гг. Известным недостатком аналитических моделей является ограниченное число типов обводов судна, возможных для описания, что и предопределило вытеснение таких моделей универсальными методами описания поверхности, позволяющими получать произвольную форму корпуса. Как известно, наиболее распространенным способом описания поверхностей произвольной формы является NURBS-моделирование. В свою очередь, применение параметрического управления к NURBS-моделям судовой поверхности на практике было впервые реализовано, по-видимому, только в 1998 г. [5] и сразу получило известность, т.к. модели данного типа удобны в практическом использовании и открывают возможности параметрической оптимизации обводов.

Таким образом, в современных условиях можно выделить три способа [12] параметризации судовых поверхностей:

- глобальная параметризация (управление поверхностью на уровне главных размерений и коэффициентов полноты, трудность внесения локальных изменений, характерно для большинства существующих аналитических моделей);
- параметризованные гидростатические трансформации (управление обводами через аффинные перестроения и гидростатические перестроения поверхности по методу Лэкенби [9] и развивающих этот метод способов);
- геометрическая параметризация [5] (наиболее общий случай, управление формой поверхности через произвольные геометрические параметры: каркасные кривые, линейные размеры, координаты точек, характерные площади и т.п.).

В большинстве широко известных САПР (FORAN [12], NAPA [10], FriendShip/CAESES [1], CATIA [6] и др.) поддерживаются все указанные методы параметризации, но возможности параметрического управления поверхностью реализованы с различной степенью интеграции в процесс проектирования, на различных принципах задания параметров и с различной степенью удобства использования при проектных исследованиях и оптимизации. Очевидно, что с точки зрения управления характерными «ледовыми» параметрами формы корпуса СЛП (наклон форштевня, развал борта, наклон батокса, длина носового заострения и т.п.) интерес представляет только геометрическая параметризация, т.к. прочие способы не позволяют целенаправленно изменять форму поверхности СЛП. При создании параметрически управляемых обводов такого типа в большинстве современных практических приложений используются параметризованные каркасные кривые, представляющие собой характерные линии теоретического чертежа корпуса судна (плоский борт, характерные шпангоуты, плоское днище и т.п.),

заданные В-сплайнами. На полученный каркас «натягивается» NURBS-поверхность в соответствии с заранее определенным набором геометрических ограничений. Такой подход в целом близок к идеологии построения наиболее совершенных аналитических поверхностей [15], с тем отличием, что В-сплайны имеют гораздо больше степеней свободы, чем аналитические функции. С одной стороны, это позволяет описывать произвольные формы, а с другой, приводит к тому, что явных геометрических ограничений (положение характерных точек, значение первых и вторых производных в них, характерные площади и т.п.) оказывается недостаточно для определения каркасного В-сплайна или NURBS-поверхности. Для однозначного определения геометрии в этом случае производится численная минимизация кривизны [4, 13] сплайна или поверхности, что существенно усложняет модель, добавляя в нее численную оптимизацию.

Отметим также один важный аспект. Идеология моделирования судового корпуса на основе NURBS-поверхностей в последнее время все чаще подвергается критике [7] из-за неудобства ее практического применения. Дело в том, что NURBS-поверхность базируется на четырехугольных «патчах», а это не согласуется с нерегулярной топологией большинства корпусов судов и заставляет прибегать к специальным приемам моделирования для компенсации данного недостатка. В ряде работ предлагается использование усовершенствованных подходов: моделирование поверхности на базе Т-сплайнов [7, 8] или с помощью интерполяционных моделей [7]. Также предлагаются решения по снижению чувствительности В-сплайнов через «параметр натяжения» (spline in tension) [3]. Однако в настоящее время эти решения еще не получили широкого распространения.

Таким образом, можно констатировать, что применительно к моделированию поверхности судов ледового плавания параметрически управляемые NURBS-модели являются потенциально более мощным инструментом, чем аналитические модели, поскольку позволяют задать произвольную модель корпуса, однако при этом они характеризуются и гораздо более высоким уровнем сложности. Аналитические методы, в свою очередь, помимо известного недостатка своей неуниверсальности имеют и ряд преимуществ, делающих их использование удобным в ряде задач для определенного «семейства» поверхностей, а именно:

- простота реализации и, соответственно, доступность для судостроителей;
- отсутствие численных процедур вычисления ординаты поверхности;
- интерпретируемость управляющих параметров.

Сопоставление обводов различных СЛП позволяет заключить, что в целом такие обводы являются достаточно единообразными и могут

быть описаны аналитически с достаточной для решения оптимизационных задач точностью. При этом, по мнению автора, известные сегодня аналитические модели (см., например, обзоры [14–16]) не удовлетворяют требованиям проектирования поверхности СЛП по ряду причин, основными из которых являются: ориентированность на гидростатические параметры, не позволяющая проектировать обводы СЛП под заданные параметры формы; невозможность описания современных форм СЛП; необходимость задания ряда параметров на основании судов-прототипов. Таким образом, нужно создать новую аналитическую модель поверхности корпуса СЛП, с помощью которой могут решаться оптимизационные и проектные задачи. Описанию такой модели посвящена данная работа, основанная на модели [18]. Формат настоящей статьи позволяет изложить только базовые расчетные соотношения аналитической модели корпуса, полное описание модели планируется к публикации в диссертационной работе автора.

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА

Разработанная аналитическая модель описывает однокорпусное судно, поверхность разбита на основной корпус и выступающие части (ледовый зуб, кормовой скег и выкружки гребных валов). Форма носовой оконечности – с наклонным форштевнем, форма кормы – традиционная, санеобразная или ледакольная.

При определении ординаты поверхности исключено использование каких-либо численных итерационных процедур, т.е. используются исключительно функциональные зависимости. Гидростатические параметры корпуса определяются численно.

Все параметры модели разделены на оригинальные и управляющие. Первые обязательно должны быть заданы пользователем и включают в себя: длину по ватерлинии, ширину, осадку, угол наклона форштевня и др. Управляющие же параметры могут быть как заданы вручную, так и приняты в качестве значений «по умолчанию». Такой подход позволяет обеспечить решение двух задач: 1 – автоматическая генерация обводов под заданные значения оригинальных параметров; 2 – детализированное управление формой обводов с помощью управляющих параметров.

Для каждого управляющего параметра записаны аналитические выражения, позволяющие определить его максимальное и минимальное значения. Эти ограничения «физичны», т.е. учитывают реальные формы СЛП. Некоторые интегральные параметры формы проверяются с помощью сопоставления значений ординат поверхности в нескольких характерных точках.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ

Уравнение ординаты поверхности носовой части U_f задается как произведение безразмерной ординаты ватерлинии $w(x, z)$ и ординаты шпангоута наибольшей ширины $sh(z)$:

$$U_f(x, z) = w(x, z)sh(z), \quad (1)$$

где $w(x, z) = \frac{1 - \bar{x}^{n(z)}}{1 + c(z)\bar{x}^{n(z)}}$. (2)

Здесь $\bar{x} = \frac{x - fsf(z)}{stf(z) - fsf(z)}$ – относительная абсцисса ватерлинии, $n(z)$,

$c(z)$ – функции-параметры, регулирующие изменение формы и полноты ватерлиний по высоте; $fsf(z)$ – кривая плоского борта в носовой части; $stf(z)$ – кривая форштевня; $cur(z)$ – кривая скругления ватерлиний выше уровня z_2 .

Таким образом, образование обводов носовой оконечности происходит путем плавного изменения параметров ватерлиний $w(x, z)$ по высоте, при этом форма шпангоутов поверхности U_f в явном виде не задается.

При определении поверхности задаются следующие параметры (рис. 1):

L_f – длина носового заострения корпуса по ледовой ватерлинии (ЛВЛ);

d – осадка судна по ЛВЛ;

B – ширина корпуса по ЛВЛ;

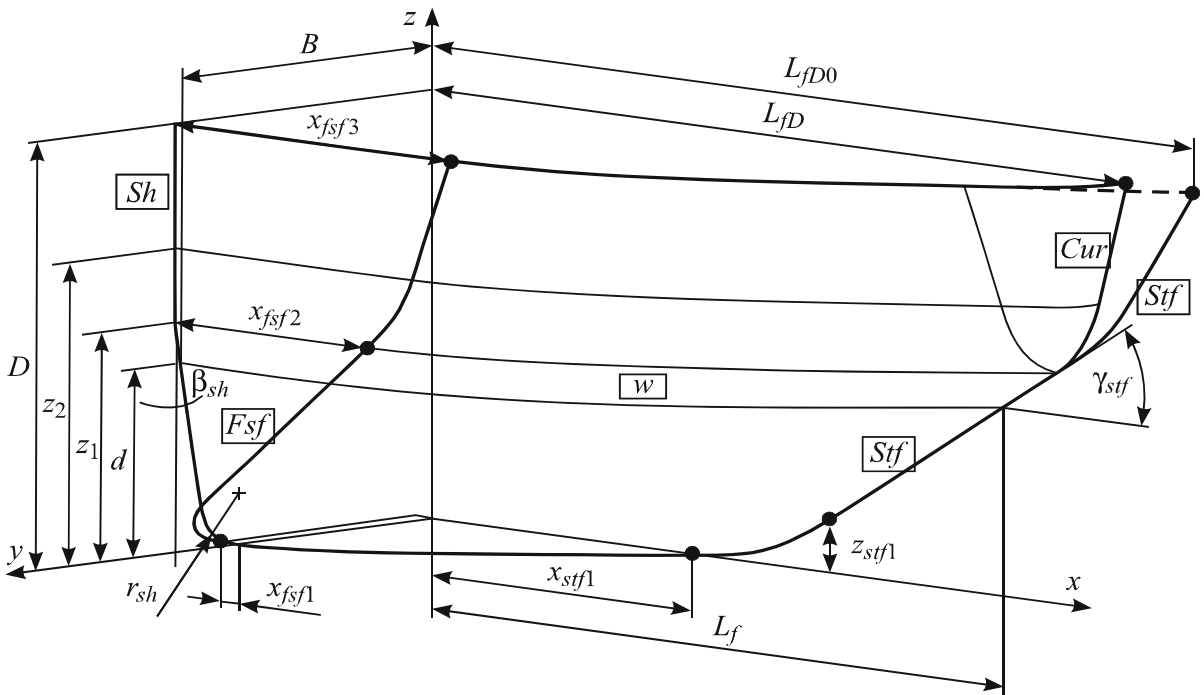


Рис. 1. Эскиз каркасных кривых (названия выделены прямоугольниками) и управляющих параметров носовой оконечности

D – высота борта;

γ_{stf} – угол наклона форштевня к горизонтали;

β_{sh} – угол наклона плоского борта к вертикали;

r_{sh} – радиус скругления скулы;

z_1 и z_2 – нижняя и верхняя аппликаты полиномиальных скруглений кривых $fsf(z)$, $stf(z)$, $cur(z)$ и $n(z)$, $c(z)$ (могут приниматься различными для каждой из кривых);

L_{Df} – длина носового заострения корпуса на уровне верхней палубы (ВП);

L_{Df0} – длина ватерлиний на уровне ВП без учета скругления;

z_{stf1} – аппликата эллиптического (нижнего) скругления форштевня;

x_{stf1} – абсцисса точки притыкания форштевня к основной плоскости (ОП);

x_{fsf1} – абсцисса точки притыкания кривой плоского борта к ОП ($z = 0$);

x_{fsf2} – абсцисса кривой плоского борта на уровне ЛВЛ ($z = d$);

x_{fsf3} – абсцисса кривой плоского борта на уровне ВП ($z = D$);

n_D, n_d, n_0 – параметры, определяющие значение $n(z)$ для высот D, d и 0 соответственно;

c_D, c_d, c_0 – параметр, определяющий значение $c(z)$ для высот D, d и 0 соответственно.

Оригинальными являются шесть параметров ($L_f, d, B, D, \gamma_{stf}, \beta_{sh}$) носовой оконечности, прочие – управляющие. Выше уровня z_2 и ниже уровня z_1 каркасные кривые $stf(z)$, $cur(z)$ и $fsf(z)$ и управляющие кривые $n(z)$, $c(z)$ имеют линейные участки, а при $z_1 \leq z \leq z_2$ выполняется плавная стыковка (скругление) линейных участков с помощью полинома пятой степени. Коэффициенты полинома определены аналитически при условии, что максимум его кривизны располагается посередине между высотами z_1 и z_2 . Такой подход позволяет получать гладкую (непрерывную по второй производной) форму кривых $stf(z)$, $cur(z)$, $fsf(z)$, $n(z)$ и $c(z)$ и обеспечивает возможность раздельного управления надводной и подводной частями корпуса, что важно в практических задачах.

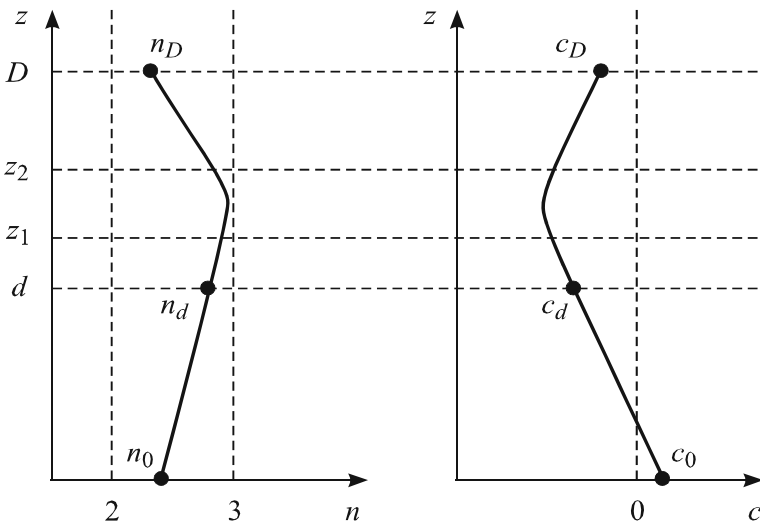


Рис. 2. Управляющие кривые $n(z)$ и $c(z)$

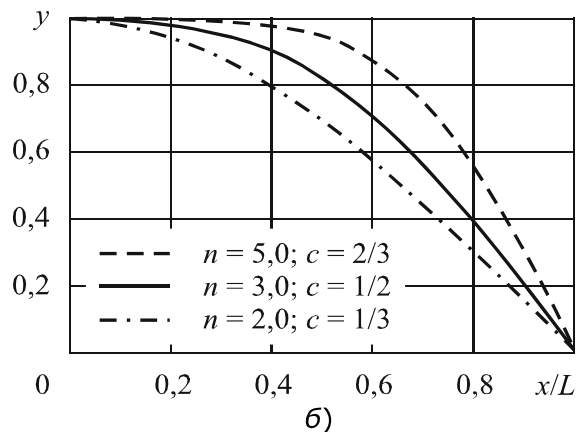
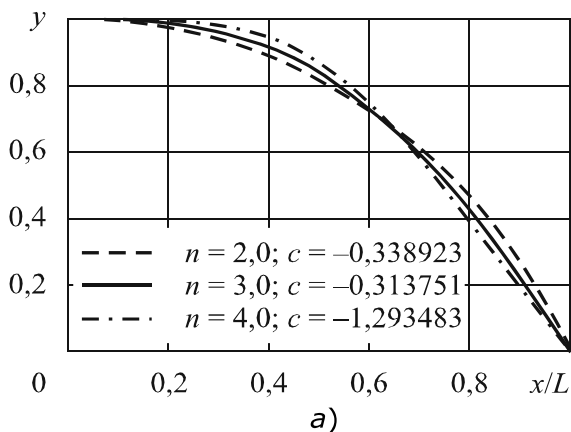


Рис. 3. Форма ватерлиний $w(x, z = \text{const})$ при различных $n(z)$ и $c(z)$

Типичный вид управляющих кривых $n(z)$ и $c(z)$ показан на рис. 2, а влияние значений $c(z)$ и $n(z)$ на форму ватерлиний $w(x, z)$ при $z = \text{const}$ может быть оценено на основании рис. 3.

На рис. 3а параметры c подобраны таким образом, чтобы при $n = 2, 3$ и 4 обеспечивался одинаковый коэффициент полноты ватерлинии $C_w = 0,72$. Все варианты формы ватерлинии на рис. 2а являются выпуклыми. На рис. 3б показано влияние параметра $n(z)$ при значениях $[c_1(z) - c(z)] \rightarrow 0$, где $c_1(z) = (n(z) - 1)/(n(z) + 1)$. Как видно, в этом случае на ватерлинии вблизи форштевня появляется участок, на котором кривизна близка к нулю и изменяется по длине очень незначительно. Приведенные клинообразные формы аналитических ватерлиний (2) близки к ватерлиниям натуральных судов в подводной части корпуса, однако для описания надводной части необходимо обеспечить возможность скругления ватерлиний в районе форштевня (рис. 1). Для этого используется депараметризованная кривая Безье второй степени, которая опирается на кривую $cur(z)$, расположенную выше уровня z_1 , и на поперечное сечение поверхности U_f , соответствующее абсциссе $x_{cur} = stf(z_1)$. Такая кривая не требует для своего определения каких-либо дополнительных параметров. Образованная семейством кривых Безье поверхность скругления $U_{cur}(x, z)$ отсекает от поверхности U_f надводную клинообразную часть при $x > x_{cur}$, что позволяет получить требуемую форму ватерлиний в надводной части форштевня.

Для удобства использования модели были получены аналитические выражения, позволяющие определить часто используемые в расчетах ледовой ходкости углы *Alfa* (между касательной к ватерлинии и диаметральной плоскостью (ДП)) и *Beta* (между касательной к шпангоуту и ДП).

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОРМОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ

При создании модели описания кормовых обводов учитывалась многовариантность типов кормовой оконечности: многовальность, возможность применения винторулевых движителей и т.п. Поэтому описание кормо-

вых обводов производится по шпангоутным сечениям, что обусловлено удобством описания различных конфигураций кормовой оконечности с помощью шпангоутов. Помимо этого в модели широко используются элементы из практики моделирования поверхностей произвольной формы (сплайны, кривые Безье), однако использование численных процедур определения ординаты поверхности исключено. Уравнения шпангоутов в каждом сечении строятся на основе каркасных кривых, форма которых определяется положением управляющих точек. Для описания каркасных кривых применяются полиномы и сплайны 4-й и 5-й степеней, причем на координаты управляющих точек наложены такие ограничения, которые исключают осцилляции и нехарактерные для судов формы кривых.

В число каркасных кривых (рис. 4), формирующих кормовую оконечность корпуса, помимо кривой шпангоута $sh(z)$ также входят:

$f_{sa}(x)$ – кривая плоского борта в корме (полином 5-й степени);

$sta(x)$ – кривая ахтерштевня (сплайн 4-й степени);

$f_{ba}(x)$ – кривая плоского днища в корме (сплайн 4-й степени);

$wla(x)$ – кривая, в точках которой происходит стык линейной надводной части шпангоутов и их криволинейной части. Уравнение этой кривой, имеющей пространственный вид, строится по проекциям на ОП (полином 4-й степени) и ДП (полином 5-й степени и линейный участок);

$uda(x)$ – кривая ВП в корме (полином 4-й степени).

Уравнение шпангоутов строится на основе семи опорных точек, изменение положения которых при увеличении абсциссы x показано на рис. 5.

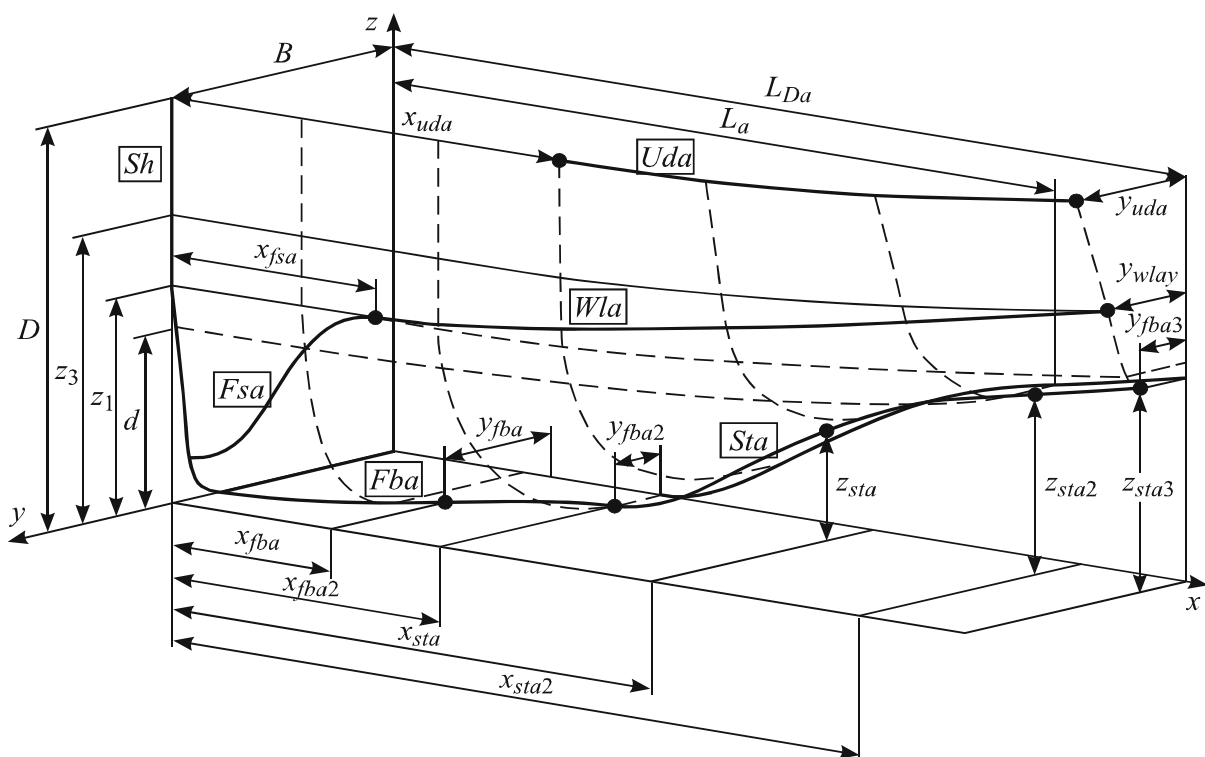
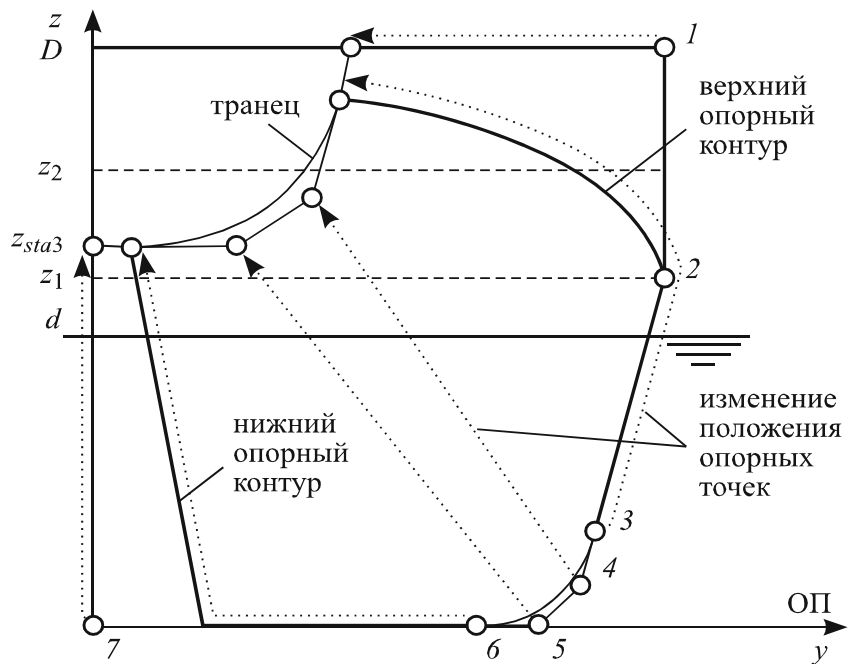


Рис. 4. Эскиз каркасных кривых (названия выделены прямоугольниками) и управляющих параметров кормовой оконечности

Рис. 5. Схема проекции «Корпус» кормовой части (цифрами обозначены точки поперечного сечения шпангоута, стрелками – перемещение точек при увеличении абсциссы x)



В каждом шпангоутном сечении точки 1–2, 2–3, 6–7 соединяются прямыми линиями, а между точками 3–4–5–6 располагается криволинейная часть шпангоутов, строящаяся при помощи депараметризованной рациональной кривой Безье 3-й степени. Точке 1 соответствует кривая $uda(x)$, точке 2 – линия слома борта на уровне z_1 , точке 3 – верхний опорный контур криволинейной части шпангоутов, представляющий собой кривую, составленную из $fsa(x)$ и $wla(x)$. Точки 4 и 5 – промежуточные точки криволинейной части шпангоутов, определяемые при помощи двух вспомогательных кривых: $upc(x)$, определяющей аппликату точки 4, и $dnc(x)$, определяющей ординату точки 5. Точке 6 соответствует нижний опорный контур криволинейной части шпангоутов, который составляется из кривых $fba(x)$ и $sta(x)$. Точка 7 представляет собой диаметральный батокс, аппликаты которого соответствуют аппликатам нижнего опорного контура.

Далее приведен полный перечень управляющих параметров (рис. 4):

- L_{Da} – длина кормового заострения корпуса на уровне ВП;
- x_{fsa} – абсцисса носовой точки кривой плоского борта $fsa(x)$;
- y_{wlay} – ордината кривой $wlay(x)$ на транце судна;
- Π_{wlay} – значение второй производной кривой $wlay(x)$ на транце судна, отвечающее за полноту кривой;
- z_3 – аппликата крайней кормовой точки кривой $wlaz(x)$;
- x_{uda} – абсцисса носовой точки кривой $uda(x)$;
- y_{uda} – ордината кормовой точки (точки на транце) кривой $uda(x)$;
- Π_{uda} – значение второй производной кривой $uda(x)$ на транце судна, отвечающее за полноту кривой;
- (x_{fba}, y_{fba}) – управляющая точка кривой $fba(x)$;
- (x_{fba2}, y_{fba2}) – кормовая концевая точка кривой $fba(x)$;
- y_{fba3} – ордината кривой плоского днища на транце судна;
- (x_{sta}, z_{sta}) – управляющая точка кривой $sta(x)$;

(x_{sta2}, z_{sta2}) – кормовая концевая точка кривой $sta(x)$;
 z_{sta3} – аппликата кормовой точки кривой $sta(x)$ на транце;
 $(x_{upc}; z_{upc})$ – управляющая точка кривой $upc(x)$;
 z_{upc2} – аппликата кормовой точки кривой $upc(x)$ на транце;
 $(x_{dnc}; y_{dnc})$ – управляющая точка кривой $dnc(x)$;
 l_{dn} – ордината кормовой точки кривой $dnc(x)$ на транце;
 nsh – параметр, с помощью которого происходит управление полной шпангоутов.

ВЕРИФИКАЦИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВАНИИ ОБВОДОВ НАТУРНЫХ СУДОВ

Для сопоставления обводов, получаемых в рамках предлагаемой модели, с обводами реальных судов был выбран ряд проектов, имеющих различную форму корпуса: ледокол-лидер (ЛК) с мощностью на валах

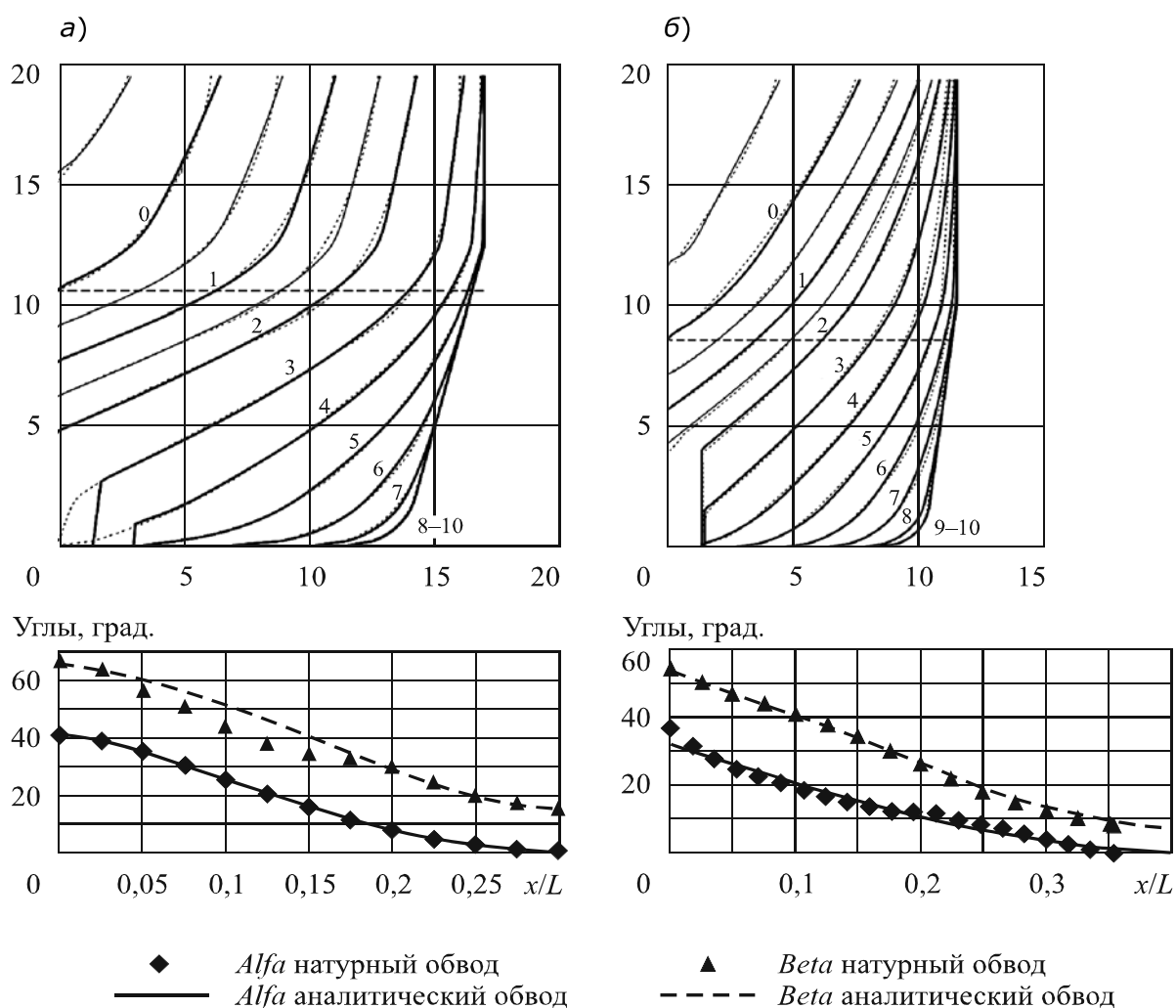
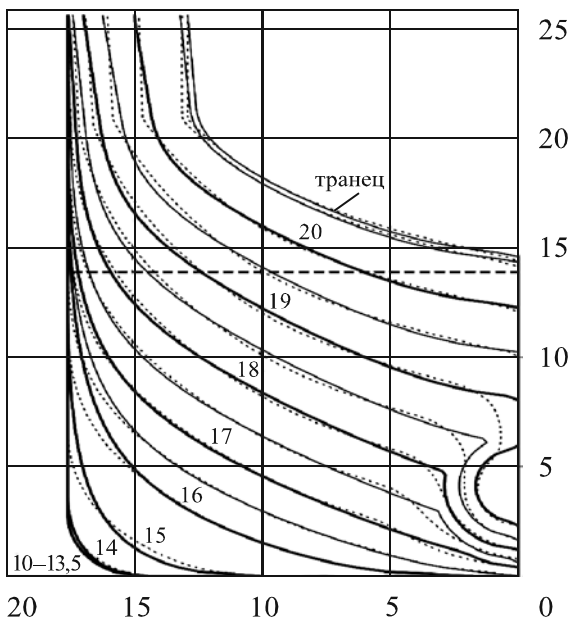
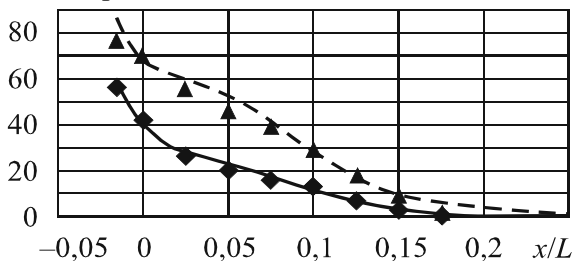


Рис. 6. Сопоставление проекций «Корпус» носовой части и углов α и β натурального и аналитического теоретических чертежей ледокола ЛК (а) и судна НЭС (б)

а)

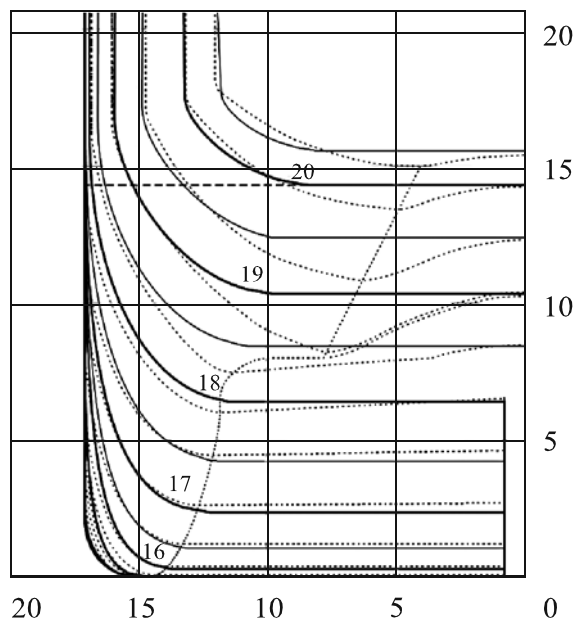


Углы, град.

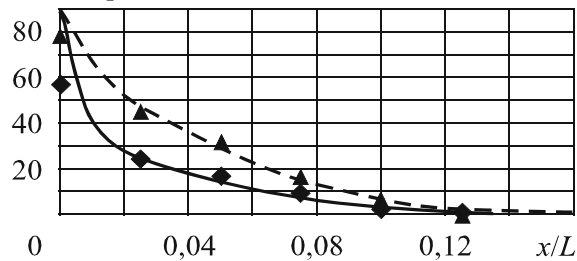


◆ *Alfa* натуральный обвод
 — *Alfa* аналитический обвод

б)



Углы, град.



▲ *Beta* натуральный обвод
 - - - *Beta* аналитический обвод

Рис. 7. Сопоставление проекций «Корпус» кормовой части и углов *Alfa* и *Beta* натурального и аналитического теоретических чертежей танкеров ТЛ (а) и ТТ (б)

60 МВт; арктическое научно-экспедиционное судно (НЭС); проект арктического танкера (ТТ) с традиционными обводами носовой оконечности и кормой, адаптированной под две поворотные винторулевые колонки; проект арктического танкера (ТЛ) с ложкообразными носовыми обводами и традиционными обводами кормы.

Сопоставление форм носовых оконечностей показано на рис. 6, а кормовых – на рис. 7. Для обеспечения максимального сближения натуральных и аналитических обводов решалась задача математического программирования, в которой в качестве неизвестных параметров выступали величины, управляющие формой аналитического корпуса, а минимизируемая функция цели представляла собой сумму квадратов разностей ординат натурального и аналитического теоретических чертежей (ТЧ). Для рассмотренных обводов стандартное отклонение

составляет около 0,2–0,7 % от ширины судна, а максимальное – 1–5 % (наибольшее значение характерно для кормовых обводов с батоксным обтеканием).

На основании рис. 6, 7 можно сказать, что аналитическая модель достаточно хорошо описывает традиционные носовые и кормовые обводы, как в части углов *Alfa* и *Beta*, так и в части ординат ТЧ. В случае кормы с батоксным обтеканием аналитическая модель обеспечивает лишь принципиальное описание обводов, не позволяя моделировать сложные формы ледовых выступов, хотя и в этом случае углы *Alfa* и *Beta* согласуются достаточно хорошо.

СФЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОРПУСА

С использованием аналитической модели могут быть выполнены различные общепроектные расчеты, расчеты по теории корабля, ледовой ходкости и управляемости, определены нагрузки со стороны воды и льда и решены практически все вопросы, актуальные при эскизном проектировании судна ледового плавания. Однако помимо этого модель может быть использована при оптимизации обводов СЛП, т.к. она является параметрически управляемой, что позволяет организовать формальную процедуру поиска оптимальных значений управляющих параметров по какому-либо критерию. Критериями могут являться, например, ледовое сопротивление в сплошном или битом льду, сопротивление на тихой воде, водоизмещение судна порожнем, параметры мореходности и ледовой управляемости, а также различные комбинации перечисленных факторов. Подчеркнем, что в зависимости от решаемой задачи на основании модели могут быть оптимизированы не только локальные параметры носовых или кормовых обводов, но и главные размерения судна.

Для подтверждения возможностей такой оптимизации приведем пример совершенствования носовых обводов НЭС по критерию сопротивления в сплошном ровном льду R_I :

$$R_I = 0,4R_I^{Ionov} + 0,3R_I^{Lind} + 0,3R_I^{Riska}, \quad (3)$$

где R_I^{Ionov} , R_I^{Lind} , R_I^{Riska} – значения ледового сопротивления, рассчитанные с помощью известных методов [17] Б.П. Ионова (1988), Г. Линдквиста (1989) и К. Риски (1997) соответственно.

Формирование критерия (3) на основе нескольких расчетных методов позволяет снизить зависимость результатов оптимизации от допущений, заложенных в каждый из методов. В качестве варьируемых при

оптимизации параметров были приняты параметры формы носовой оконечности, причем осадка, ширина и длина по ватерлинии, угол наклона форштевня принимались постоянными. В качестве ограничений оптимизации были приняты условия равенства на исходном и оптимизированном вариантах ТЧ (для участка корпуса с 0-го по 10-й теоретические шпануоты) следующих параметров: водоизмещение, площадь ВП, площадь ватерлинии на уровне 15 м, абсцисса центра величины. Помимо этого введено условие: на оптимизированном варианте ТЧ площадь смоченной поверхности должна быть не больше, чем на исходном. Эти параметры отражают как типичные для проектирова-

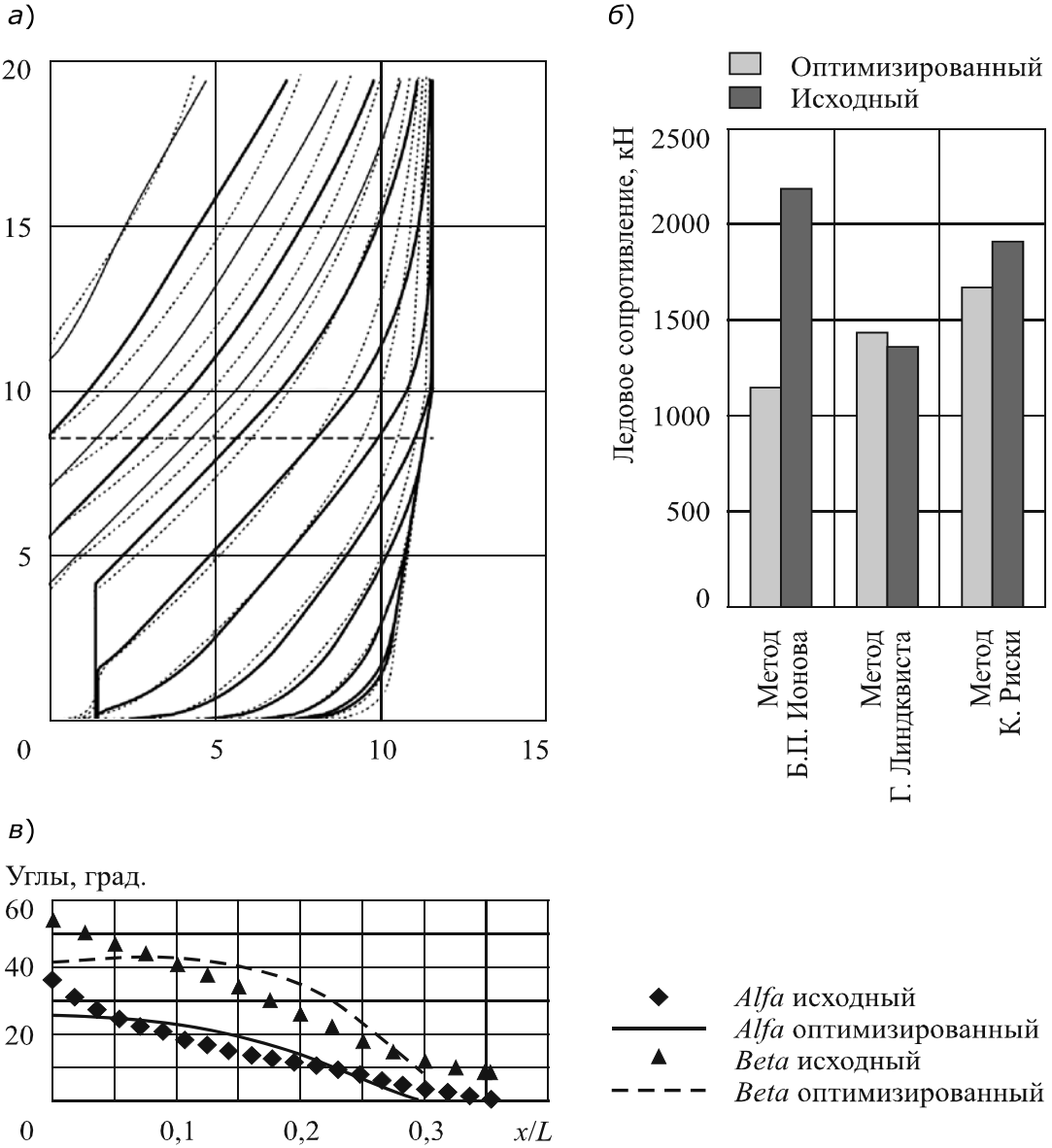


Рис. 8. Оптимизация обводов НЭС по критерию ледового сопротивления:
 а) проекция «Корпус» исходного (---) и оптимизированного (—) обводов;
 б) ледовое сопротивление при толщине льда 1,4 м и скорости 2 уз;
 в) углы Alfa и Beta

ния судна проектные ограничения (фиксированность главных размеров, водоизмещения и центра величины), так и специализированные требования по площади ватерлиний. Кроме того, через величину смоченной поверхности косвенно учитываются требования ходкости на тихой воде.

В результате оптимизации с использованием функции автоматической многомерной численной оптимизации в среде MS Excel, значение критерия (3) удалось снизить на 25 % при выполнении всех ограничений (площадь смоченной поверхности снижена на 0,4 %). Сопоставление исходного и оптимизированного вариантов ТЧ приведено на рис. 8.

Очевидно, что если бы при оптимизации учитывалось не только ледовое сопротивление, но другие критерии (ходкость на тихой воде, мореходность на волнении и др.) со своими весовыми коэффициентами, то результат оптимизации был бы другим. Однако в данном примере важен не столько результат, сколько демонстрация самой возможности выполнения оптимизации характеристик СЛП на основе аналитической модели.

После оптимизации и всех необходимых на ранних стадиях проектных расчетов аналитическая поверхность СЛП может быть экспортирована в судостроительный САПР для окончательной доработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметрически управляемые модели судовой поверхности значительно повышают качество выполнения проектных работ, обеспечивая многовариантность проектных проработок и позволяя детально оптимизировать характеристики судна.

Несмотря на широкие возможности сложных параметрически управляемых NURBS-моделей судовой поверхности, для задач оптимизации и исследовательского проектирования СЛП, имеющих характерные клинообразные обводы, удобно использование аналитических моделей обводов, которые гораздо более просто интегрируются в различные расчетные приложения. Соответствующая аналитическая модель создана в рамках настоящей работы и ориентирована на параметрическое управление характерными для СЛП элементами формы: углы наклона шпангоутов, батоксов, ватерлиний, характерные длины, площади и т.п. Верификация модели подтвердила близость аналитических обводов к обводам натуральных СЛП и ледоколов.

Представляется перспективным дальнейшее развитие идей параметрической оптимизации обводов СЛП не только по критериям ледового сопротивления, но и с учетом сопротивления на тихой воде и в условиях волнения. Также значительный интерес представляет интеграция

параметрической модели корпуса в системы оптимизационного проектирования СЛП, что позволит уже на ранних стадиях проектирования судна получать рекомендации по его предпочтительным размерениям и параметрам формы с учетом соотношения «ледовые качества / ходовые качества на тихой воде».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Abt C., Harries S.* Friendship-Framework – integrating ship-design, modeling, simulation and optimization // *The Naval Architect*. January 2007. P. 36–37.
2. *Bole M., Lee B.-S.* Integrating parametric hull generation into early stage design // *Ship Technology Research*. 2006. Vol. 53. P. 115–137.
3. *Del Puppo, N., Contento G.* A parametric representation of fair hull shapes by means of splines in tension // *Sustainable Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources*. 2011. P. 449–459.
4. *Han S., Lee Y.-S., Choi Y.B.* Hydrodynamic hull form optimization using parametric models // *Journal of Marine Science and Technology*. March 2012. Vol. 17. Issue 1. P. 1–17.
5. *Harries S.* Parametric design and hydrodynamic optimization of ship hull forms. PhD Thesis, Berlin, Germany: Technische Universität, 1998.
6. *Ginnis A.I. et al.* A CATIA ship-parametric model for isogeometric hull optimization with respect to wave resistance // *15th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS'2011)*. Trieste, Italy, 2011.
7. *Koelman H.J.* A mid-term outlook on computer aided ship design // *12th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT'2013)*. Cortona, Italy, 2013. P. 110–119.
8. *Kostas K.V. et al.* Ship-hull shape optimization with a T-spline based BEM-isogeometric solver // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Feb. 2015. Vol. 284. P. 611–622.
9. *Lackenby H.* On the systematic geometric variation of ship forms // *RINA-Transactions*. 1950. Vol. 92. P. 289–316.
10. *Maisonneuve J.J. et al.* Towards optimal design of ship hull shapes // *8th International Marine Design Conference (IMDC'03)*. Athens, Greece, 3–5 June, 2003. P. 1150–1155.
11. *Piegl L., Tiller W.* *The NURBS Book*. NY: Springer-Verlag, 1997.
12. *Rodrigues A., Fernandez-Jambrina L.* Programmed design of ship forms // *Computer-Aided Design*. 2012. № 44. P. 687–696.
13. *Zhang P., Zhu D., Leng W.* Parametric approach to design of hull forms // *Journal of Hydrodynamics*. 2008. № 20 (6). P. 804–810.
14. *Богданов А.А.* Современные методы построения и согласования теоретического чертежа корпуса судна с помощью ЭВМ // *Судостроение за рубежом*. 1972. № 8. С. 18–31.
15. *Ковалев В.А.* Новые методы автоматизации проектирования судовой поверхности. Л.: Судостроение, 1982.
16. Методы построения и согласования судовой поверхности при помощи ЭВМ / Под ред. проф. В.В. Ашика. Л.: Судостроение, 1978.

17. *Сазонов К.Е.* Теоретические основы плавания судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010.
18. *Таровик О.В.* Аналитическое описание обводов носовой оконечности судов ледового плавания // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 63 (347). С. 93–104.