

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НА РАННИХ ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА СУДНА ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

М. Э. Францев, канд. техн. наук  
(e-mail: gepard629@yandex.ru)

УДК 629.12.001

Применение композитов позволяет создавать суда с высокими аэро- и гидродинамическими характеристиками, легкими надстройками, эффективным дизайном внешнего облика и рядом других достоинств. Композиты могут значительно сократить сроки строительства судна по сравнению с судами из традиционных материалов. Это обуславливает серьезную экономическую мотивацию развития массового судостроения из композитов. Мировой судостроительный опыт свидетельствует о высокой экономической эффективности производства такого типа судов.

Сегодня большую часть мирового малотоннажного промышленного, служебно-разъездного и прогулочного флота составляют суда, имеющие корпус из композитов, однако в современной России они проектируются и строятся в весьма небольших количествах. Отечественный опыт проектирования судов из композитов ограничивается несколькими десятками проектов судов, как правило военного назначения, за редкими исключениями водоизмещающих, а также небольших катеров и мотолодок. В то же время во всем мире ежегодно создается множество проектов судов из композитов преимущественно гражданского назначения, в том числе, например, промышленные суда, которые в России не проектируются вообще. При этом необходимость в судах такого типа существует и в России. Это приводит к переориентации ряда отечественных судовладельцев на продукцию зарубежного судостроения. В качестве примеров, подтверждающих этот тезис, можно привести многочисленные факты приобретения рыбаками Дальнего Востока промышленных судов из композитов в Японии, где в эксплуатации находится более трехсот тысяч судов этого типа. Приобретают промышленные суда из компо-

зитных материалов в Норвегии и рыбаки европейского Севера России, в первую очередь ведущие промысел в бассейне Белого моря. В отечественном судостроении создается ничтожно мало проектов судов из композитов с использованием углепластиков и органопластиков, которые сейчас широко используются в мировой судостроительной практике.

Для расширения возможностей создания отечественных судов из композитов в настоящее время необходимо решить ряд проблем, как в области совершенствования проектных характеристик судов и их оптимизации, так и в области улучшения структуры всего процесса проектирования. Необходима разработка способов проектного обоснования таких судов, учитывающих различные аспекты их последующей эксплуатации и обеспечивающих их конкурентоспособность.

Известно, что в области мирового малотоннажного судостроения, подобно автомобилестроению, сформировалась практика создания модельных рядов малых судов, которая позволяет производителям эффективно конкурировать между собой. Очень часто при разработке новой модели малого судна производители ориентируются на наличие или отсутствие в предполагаемом размерном интервале продукта конкурентов. Предполагаемые характеристики новой модели судна предлагаются, в первую очередь, маркетологами на основании проведенного анализа рынка и в дальнейшем уточняются конструкторами в процессе проектирования. Существенное конкурентное преимущество современного производителя заключается в своевременном обновлении им модельного ряда выпускаемых судов.

В этой связи представляется востребованной вариативная модель проектирования, опирающаяся на

использование параметрических методов. Она позволяет проектанту, в рамках экономической целесообразности, быстро переходить от одного размера судна к другому, связывая конструктивные элементы судна и характеризующие их параметры посредством проектных ограничений, определяемых условиями эксплуатации. Накладывая и удаляя такие ограничения, а также варьируя значения параметров, разработчик может изменять элементы проектируемого судна.

Современные стандарты проектирования предусматривают последовательное снижение затрат на такие наиболее дорогие и сложные разделы проекта, как разработка гидродинамического комплекса, а также прочностные расчеты, которые реализуются на базе единожды выполненных научных исследований и накопленного опыта эксплуатации. Этим же обусловлена все более широкая замена при разработке проекта натурального эксперимента численным расчетом. При создании современного проекта судна из композитов гражданского назначения большая часть затрат направляется на дизайнерскую проработку проекта в части экстерьера судна, эргономики его интерьеров, цветовых решений, применяемого оборудования и отделочных материалов. При этом судно должно обладать сбалансированной совокупностью эксплуатационных качеств, отвечающих ожиданиям потенциальных заказчиков. Поэтому в современных условиях быстрого технологического развития экономики весьма остро стоит вопрос об оптимизации конструкции малотоннажного судна, проектирование которого ограничено ресурсами, когда у разработчика нет возможности искать оптимальное решение методом проб и ошибок.

Способ позволяет формализовать процессы выбора оптимальной структуры характеристик проектируемого малотоннажного судна из композитов с помощью разработанной методической общности задач анализа информации о ранее построенных судах подобного типа и синтеза проектных обоснований. При этом проектировщик оперирует на единой основе множеством технических показателей характеристик судов (масса, размеры, мощность и их соотношения) и показателей ка-

чества функционального использования (эксплуатационные и экономические характеристики) с помощью специфических экономико-информационных и математических моделей различного типа и вида.

Основным принципом, реализуемым в способе структурно-параметрического проектирования малотоннажного судна, является выявление и оптимизация макропеременных, опирающаяся на анализ связанных с ними технико-экономических показателей, определяемых показателями функционального использования судна в эксплуатации в рассматриваемом размерном интервале. При этом используется двухуровневая иерархия упрощенной логико-математической модели, в которой верхний уровень модели связан с эксплуатационными качествами судна, а нижний уровень представляет собой систему основных проектировочных уравнений, в которые в качестве переменных входит небольшое количество характеристик судна (параметров), к которым подстраиваются остальные [1, 2].

Физической моделью способа структурно-параметрического проектирования судов из композитов, в том числе скоростных, является подобие гидродинамических процессов на расчетных режимах движения в рамках единой компоновки всего судна. Подобие обусловлено относительно небольшим различием геометрических размеров наибольшего и наименьшего судов ряда (как правило, не более чем в пять раз).

Непосредственному структурно-параметрическому синтезу характеристик проектируемого судна предшествует разработка базы данных моделей множества возможных технических решений. Проектные характеристики построенных судов при этом организуются в виде множества возможных решений, а затем упорядочиваются по степени их относительной предпочтительности. Задача проектирования судна имеет несколько критериев оптимизации, из которых на последующих этапах проектирования выбирается основной критерий, поэтому при формировании базы данных необходимо стремиться к максимально возможному учету всех технико-экономических показателей, а также показателей функционального ис-

пользования (эксплуатационных качеств) [1, 2].

Параметрический ряд судов — это упорядоченная совокупность числовых значений их проектных характеристик. В параметрических рядах наряду с размерами судов, характеристиками их массы и мощности важную роль играют отдельные элементы нагрузки масс, расходные характеристики судовой энергетической установки, особенности их движительных комплексов и пр. В случае группировки судов в параметрическом ряду по одному или нескольким ключевым признакам, например таким, как особенности гидродинамического комплекса, а также другим конструктивно-технологическим решениям, можно говорить о типоразмерном параметрическом ряду.

При выборе параметров для параметрических рядов прежде всего решается вопрос о мерности рядов. Параметрический ряд, построенный для одного главного параметра, будет одномерным. Обоснованный выбор параметров для построения параметрического ряда имеет большее значение для создания оптимального набора сбалансированных характеристик как одного судна, так и группы судов нескольких размеров. Необходимо отметить, что построение параметрического ряда для одного главного параметра и его оптимизация не всегда позволяют создать судно с оптимальными параметрами. Более перспективно построение многомерных параметрических рядов, охватывающих не только основные, но и вспомогательные параметры судна. В то же время создание многомерных параметрических рядов судов — чрезвычайно сложная задача, и, по существу, создание оптимальных многомерных параметрических рядов судов находится на начальной стадии развития.

Проиллюстрируем изложенные выше соображения следующим примером. При разработке проекта скоростного глиссирующего судна из композитов основными неизвестными являются его главные размеры и другие характеристики:

$$\delta, \beta, L, B, T, H, D, N.$$

Для анализа изменения проектных характеристик на интересующем проектанта размерном интерва-

ле должна быть сформирована база данных. База данных содержит значения проектных характеристик построенных судов данного типа, имеющих аналогичные гидродинамические комплексы и близкие архитектурно-компоновочные решения. Значения характеристик в базе данных могут быть представлены, например, в виде

$$\delta = \delta_1, \delta_2, \delta_3 \dots \delta_n;$$

$$L/B = (L/B)_1; (L/B)_2; (L/B)_3 \dots (L/B)_n;$$

$$B/T = (B/T)_1; (B/T)_2; (B/T)_3 \dots (B/T)_n;$$

$$H/T = (H/T)_1; (H/T)_2; (H/T)_3 \dots (H/T)_n.$$

В результате анализа базы данных могут быть получены изменения проектных характеристик, которые могут быть представлены в виде функций независимой переменной — геометрического параметра — базовой длины судна  $L^*$  в заданном интервале в виде

$$L = f_1(L^*);$$

$$B = f_2(L^*);$$

$$T = f_3(L^*);$$

$$\delta = f_4(L^*);$$

$$D = f_5(L^*).$$

В качестве единой независимой переменной принимается базовая длина  $L^*$ , которая представляет собой габаритную длину судна в походном положении по несъемным частям. Эта величина очень информативна, потому что на базовой длине расположено подавляющее большинство масс судна. Часто в открытых источниках величины главных элементов построенных судов приводятся не полно, а в ряде случаев с искажениями. В то же время значения базовой длины этих судов, как правило, приводятся достоверно. Кроме того, базовая длина судна может быть измерена. Можно представить отдельные статьи нагрузки масс также в виде функций той же независимой переменной  $L^*$ :

$$P_i = f_i(L^*);$$

$$P_i = f_i(L^*).$$

При этом в виде  $P_i$  обозначаются статьи нагрузки, входящие в водоизмещение порожнем судна, а в виде  $P_i$  обозначаются статьи нагрузки, входящие в дедвейт судна. В свою очередь, водоизмещение порожнем  $D_{\text{пор}}$  и дедвейт судна  $DW$  также могут быть представлены в виде функций  $f_6(L^*)$  и  $f_7(L^*)$  независимой переменной  $L^*$  в пределах рассматриваемого интервала [3].

Сбалансированность проектных характеристик разрабатываемого судна определяется системой проектных уравнений: плавучести, нагрузки масс и мощности — ходкости, при этом для каждого из проектных вариантов она представляется в виде

$$D = f_5(L^*) = \gamma\delta LBT =$$

$$= \gamma f_1(L^*) f_2(L^*) f_3(L^*) f_4(L^*);$$

$$D = D_{\text{пор}} + DW = f_6(L^*) + f_7(L^*) =$$

$$= \sum_{i=1}^k P_i + \sum_{i=1}^l P_i = \sum_{i=1}^k f_i(L^*) + \sum_{i=1}^l f_i(L^*);$$

$$N = \frac{D_n V_m}{C_{mn}} = \frac{f_5(L^*)^n v^m}{\varphi(D, Fr)},$$

где  $f_1(L^*), f_2(L^*), f_3(L^*), f_4(L^*)$ , — соответственно значения главных размерений;  $f_5(L^*)$  — полная масса;  $f_6(L^*)$  — водоизмещение порожнем;  $f_7(L^*)$  — дедвейт;  $f_i(L^*)$  — значения статей нагрузки масс по разделу «Водоизмещение порожнем»;  $f_i(L^*)$  — значения статей нагрузки масс по разделу «Дедвейт»;  $\varphi(D, Fr)$  — коэффициент, связывающий полную массу, мощность и скорость для анализируемых значений полной массы и скоростного интервала, представленного в виде относительной скорости — числа Фруда по водоизмещению [3, 4].

При проектном обосновании судна из композитов выполняется определение главных размерений  $L, B, H, T, \delta$ , а также других размеров судна типа  $V_{\text{роб}}, B/V, H/T, V_{\text{роб}}/B$ , характеристик полной массы  $D$  и таких ее составляющих, как водоизмещение порожнем  $D_{\text{пор}}$  и дедвейт  $DW$ , а также значения грузоподъемности  $P_{\text{гр}}$ , массы топлива  $P_{\text{топл}}$ , массы экипажа  $P_{\text{эк}}$ , массы пассажиров  $P_{\text{пасс}}$  и массы запаса питьевой воды  $P_{\text{вода}}$ , коэффициента ути-

Представление параметрического ряда судов из композитов с использованием результатов, полученных при обработке баз данных

Характеристика	$L_1^*$	$L_2^*$	...	$L_n^*$
$L$	$L = a_1 L_1^{b1}$	$L = a_1 L_2^{b1}$		$L = a_1 L_n^{b1}$
$B$	$B = a_2 L_1^{b2}$	$B = a_2 L_2^{b2}$		$B = a_2 L_n^{b2}$
$T$	$T = a_3 L_1^{b3}$	$T = a_3 L_2^{b3}$		$T = a_3 L_n^{b3}$
$H$	$H = a_4 L_1^{b4}$	$H = a_4 L_2^{b4}$		$H = a_4 L_n^{b4}$
$\delta$	$\delta = a_5 L_1^{b5}$	$\delta = a_5 L_2^{b5}$		$\delta = a_5 L_n^{b5}$
$D$	$D = a_6 L_1^{b6}$	$D = a_6 L_2^{b6}$		$D = a_6 L_n^{b6}$
$DW$	$DW = a_7 L_1^{b7}$	$DW = a_7 L_2^{b7}$		$DW = a_7 L_n^{b7}$
$\eta$	$\eta = a_8 L_1^{b8}$	$\eta = a_8 L_2^{b8}$		$\eta = a_8 L_n^{b8}$
$D_{\text{пор}}$	$D_{\text{пор}} = a_9 L_1^{b9}$	$D_{\text{пор}} = a_9 L_2^{b9}$		$D_{\text{пор}} = a_9 L_n^{b9}$
$P_i$	$P_i = a_{10} L_1^{b10}$	$P_i = a_{10} L_2^{b10}$		$P_i = a_{10} L_n^{b10}$
$P_i$	$P_i = a_{11} L_1^{b11}$	$P_i = a_{11} L_2^{b11}$		$P_i = a_{11} L_n^{b11}$
$N$	$N = a_{12} L_1^{b12}$	$N = a_{12} L_2^{b12}$		$N = a_{12} L_n^{b12}$
...				
$v$	$v = a_n L_1^{bn}$	$v = a_n L_2^{bn}$		$v = a_n L_n^{bn}$

лизации по дедвейту  $\eta$ , модуля массы корпуса  $a_{\text{корп}}$  и коэффициента пропорциональности для расчета массы энергетической установки  $k_{\text{эу}}$  по интервалу базовой длины  $L^*$  с использованием результатов анализа баз данных [5]. При этом сопоставляются и выбираются варианты по экономическому критерию.

Ряды значений этих функций, построенные на множестве значений независимой переменной  $L^*$  в пределах рассматриваемого интервала, позволяют осуществлять переход от основных размеров и других характеристик одного варианта судна к основным размерам и другим характеристикам другого варианта судна, варьируя только один параметр  $L^*$  как наиболее универсальный, при этом оставаясь в зоне предпочтительности. При помощи вариаций по базовой длине можно получить семейство характеристик ряда судов из композитов, сбалансированных по соотношениям основных размеров и других характеристик. Например элементом нагрузки масс. При необходимости можно варьировать другие геометрические параметры судна, предварительно задав интервал изменения и построив на них в качестве независимой переменной аналогичное семейство функций (таблица) Определение главных размерений и других геометрических характеристик судна дополняется определением характеристик его ожидаемой скорости и

мощности, полученных на базе анализа уравнений «мощности—ходкости».

Для скоростных судов типа глиссеров, например, оно может быть представлено в виде зависимости между величинами полной массы  $D$ , скорости  $v$  и мощности  $N$ :

$$C_{\text{скор}} = Dv/N,$$

где  $C_{\text{скор}}$  — коэффициент.

В дополнение к приведенной выше зависимости можно использовать еще одну. Скорость в эту формулу входит в первой степени, а величина смоченной поверхности корпуса, как и в формуле адмиралтейских коэффициентов, учитывается показателем  $2/3$  у величины полной массы. Мощность при этом может быть выражена как

$$C_f = vD^{2/3}/N,$$

где  $C_f$  — коэффициент.

В качестве одного из способов определения этих коэффициентов может быть использована обработка баз данных существующих катеров и малых судов из композитов служебно-разъездного назначения, содержащих большое количество характеристик ( $D, N, v$ ), с использованием методов регрессионного анализа. Более подробно эти вопросы рассматриваются в работах [4, 6].

Полученное семейство графиков (рис. 1, 2) в сочетании с описы-

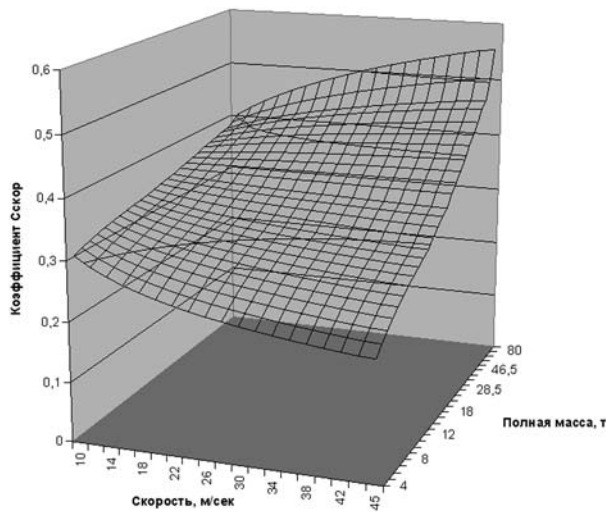


Рис. 1. Изменение коэффициента  $C_{сопр}$  в зависимости от полной массы и скорости для глиссеров

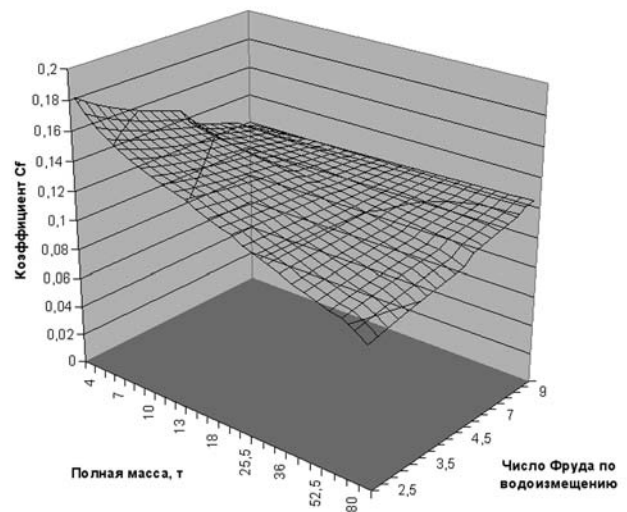


Рис. 2. Изменение коэффициента  $C_f$  в зависимости от полной массы и скорости для глиссеров

вающими их уравнениями образует устойчивые взаимосвязи между такими характеристиками скоростных судов из композиционных материалов, как полная масса  $D$ , мощность главных двигателей  $N$ , а также их скоростными характеристиками: ско-

ростью  $v$  и числом Фруда по водоизмещению  $Fr_v$ . Форма поверхностей, объединяющих эти графики, характеризуется достаточной гладкостью, что позволяет использовать полученные зависимости для анализа и практических расчетов.

Определение проектных характеристик судов из композитов структурно-параметрическим способом целесообразно выполнять в табличной форме, задавая значения базовой длины выбранного интервала, определяемого эксплуатационными

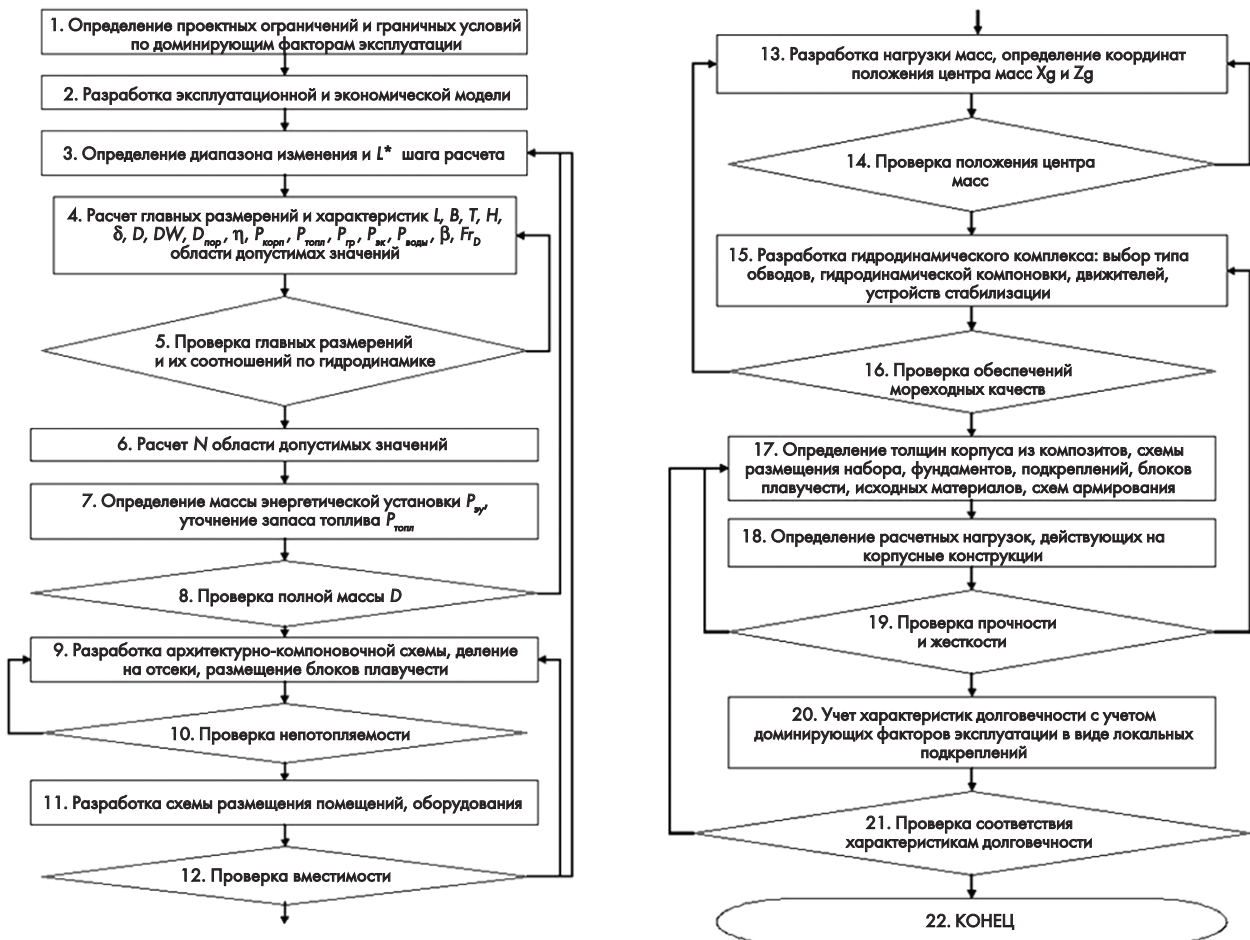


Рис. 3. Алгоритм проектирования судна из композитов с использованием структурно-параметрического способа

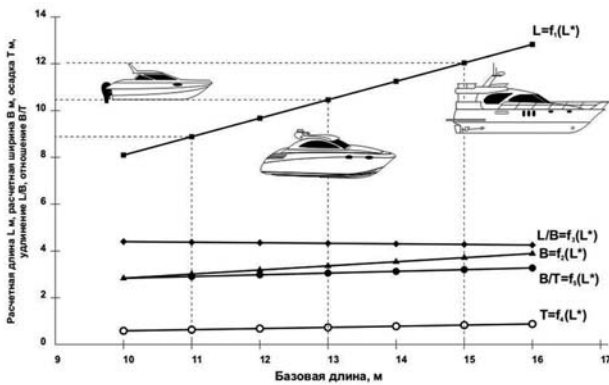


Рис. 4. Изменение главных размерений судов из композитов

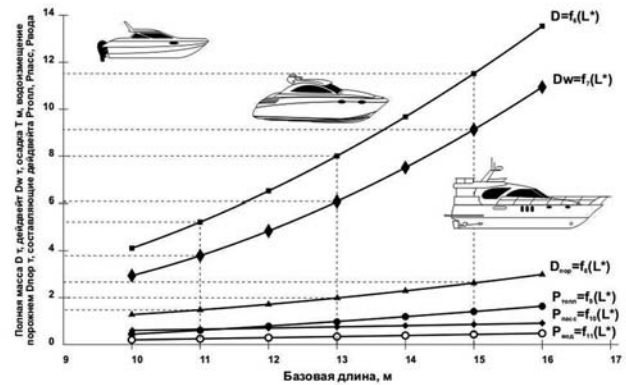


Рис. 5. Изменение характеристик нагрузки масс судов из композитов

и экономическими ограничениями. Такая форма представления проектных характеристик позволяет учитывать существующие ограничения, предусмотренные нормативными документами, которые, как правило, также имеют привязку к различным размерам судна. Кроме того, табличная форма позволяет рассчитывать главные размерения и другие характеристики целого ряда судов из композитных материалов, в том числе различного назначения, в рамках единой проектной структуры, общей архитектурно-компоновочной схемы и подобной гидродинамической модели. Алгоритм проектирования судна из композитов с использованием структурно-параметрического способа приведен на рис. 3.

В целях подтверждения работоспособности способа выполнено определение ряда проектных характеристик, таких как главные размерения, их соотношения и коэффициенты полноты, а также составляющие полной массы судна.

При определении проектных характеристик использовались две независимые базы данных. В эти базы данных для анализа были включены скоростные однокорпусные суда из композитов, имеющие остроскулые обводы, близкие к обводам «глубокое V», — всего около 800 различных проектов. Рассматривались две большие группы судов по назначению: промысловые — около 130 проектов и служебно-разъездные — все остальные. Суда из композитов, являвшиеся объектом анализа, имеют полную массу от 2

до 160 т, длину от 9 до 42 м, установленную мощность главных двигателей от 200 до 8000 кВт, скорость полного хода от 10 м/с (19 уз) до 21 м/с (40 уз).

Выполнено несколько вариантов группировки судов для анализа различных проектных характеристик. В качестве основного параметра при анализе геометрических и массовых характеристик принималась базовая длина. При анализе характеристик ходкости в качестве основных параметров принимались относительная скорость (число Фруда по водоизмещению) и полная масса.

Определение таких проектных характеристик судов из композитов, как главные размерения и их соотношения, а также составляющие полной массы  $D_{пор}$ , в том числе составляющие водоизмещения порожнем  $D_{пор}$  и дедвейта  $DW$ , выполнено различными способами с использованием результатов анализа различных баз данных. При этом вычислены погрешности определяемых величин для одного и того же размера

судна. Погрешность вычисленных различными способами величин составляет 3—5% и уменьшается с увеличением длины судна. Проверка сбалансированности полученных значений выполнена по проекторочным уравнениям плавучести, нагрузки масс и мощности—ходкости.

Графическое изображение изменения проектных характеристик скоростных глиссирующих судов из композитов служебно-разъездного и прогулочного назначения для интервала базовой длины 10—16 м, полученные с использованием параметрических методов, приведены на рис. 4—5.

Для определения экономической эффективности полученных проектных обоснований судна они дополняются расчетами его экономических характеристик в соответствии с выбранным экономическим критерием (например, операционной прибылью от эксплуатации промыслового судна).

Изменение экономической характеристики рассматривается на размерном интервале выбранного параметра. На рис. 6 представлен расчет условной прибыли от промысла рыбы типа хамсы, тюльки и шпрота в Азово-Черноморском бассейне для судов длиной от 8 до 24 м [5]. После анализа экономического блока расчетов определяется экономически обоснованный размерный интервал основного параметра, в рамках которого ведется дальнейшее проектирование судна.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что способ про-

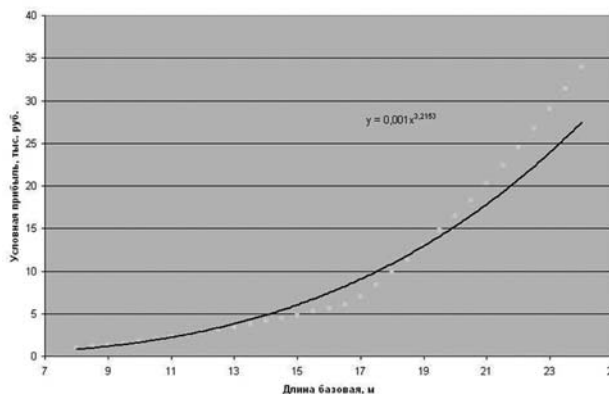


Рис. 6. Расчет условной прибыли от промысла рыбы типа хамсы, тюльки и шпрота в Азово-Черноморском бассейне для судов длиной от 8 до 24 м

ектного обоснования главных элементов и их соотношений, а также других характеристик судов из композиционных материалов на основе параметрических методов работоспособен.

Приведенный пример доказывает принципиальную возможность использования параметрических методов проектирования для получения значений главных размерений, а также других характеристик, включая характеристики полной массы, мощности и скорости для глиссеров на ранних стадиях проекта, как для одного судна из композитов, так и для группы судов, образующих типоразмерный ряд.

Использование параметрических методов существенно снижает трудоемкость обоснования выбора проектных характеристик и обеспечивает вариативность проектирова-

ния, что позволяет эффективно оптимизировать характеристики судна применительно к имеющимся экономическим ограничениям.

В заключение необходимо отметить, что предложенный способ структурно-параметрического проектирования малотоннажных судов, изготовленных из композитных материалов или имеющих в своей конструкции существенные элементы из композитов (например, верхние строения), позволяет получить существенный выигрыш в затратах на поисковые исследования начального этапа проектирования. Результаты, полученные с помощью данного способа, достаточно эффективны и просты в дальнейшем применении. После определения основных проектных характеристик судна разработка отдельных разделов проекта ведется традиционными методами.

#### Литература

1. Пашин В. М. Оптимизация судов. Л.: Судостроение, 1983.
2. Царев Б. А. Оптимизационное проектирование скоростных судов. Л.: ЛКИ, 1988.
3. Францев М. Э. Способ проектного обоснования главных элементов и других характеристик судов из композиционных материалов при помощи анализа баз данных // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2011. № 3.
4. Францев М. Э. Проектный анализ различных форм уравнения «мощности—ходкости» при разработке проекта скоростного судна из композитов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. № 1.
5. Францев М. Э. Проектные особенности зарубежных промысловых судов из композиционных материалов для прибрежного лова // Судостроение. 2010. № 5.
6. Францев М. Э. Проектное обоснование оптимальных сочетаний характеристик массы, мощности и скорости для скоростных судов из композитов методами анализа баз данных // Наука и техника транспорта. 2010. № 3.

## ТРАЛЬЩИК «АЛЕКСАНДР ОБУХОВ»



26 марта из эллинга ОАО «Средне-Невский судостроительный завод» состоялся вывод корпуса головного базового тральщика «Александр Обухов» (проект 2700 «Александрит»). Кораблю присвоено имя прославленного балтийского катерника — Героя Советского Союза А. А. Обухова (1917—2009). Уникальность корабля в том, что при водоизмещении более 800 т его корпус сформирован из монолитного стеклопластика методом вакуумной инфузии. На корабле будет установлен современный противоминный комплекс, включающий мощные гидроакустические средства обнаружения и противоминные аппараты.