

УДК 629.12.001

М.Э. Францев

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
НА РАННИХ ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА АМФИБИЙНЫХ  
СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ, ПОЛНОСТЬЮ ИЛИ ЧАСТИЧНО  
ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИТОВ**

ЗАО «Нептун-Судомонтаж», г. Долгопрудный Московской обл.

Использование параметрических методов для определения основных характеристик скоростных судов на ранних стадиях проектирования позволяет совершенствовать процесс проектирования. В статье излагается способ параметрического проектирования амфибийных судов на воздушной подушке, полностью или частично изготовленных из композиционных материалов. Представлен алгоритм процесса проектирования.

*Ключевые слова:* параметрические методы, проектирование амфибийных судов на воздушной подушке, композиты.

На территории России существует достаточно большое количество мест, где возможно эффективное применение амфибийных судов на воздушной подушке (АСВП) для круглогодичных и сезонных перевозок. Накоплен определенный опыт создания транспортных средств этого типа различных размеров. В настоящее время АСВП в России применяются в наибольшей степени для перевозки людей, а также для спасательных работ и других задач.

В то же время массовое применение АСВП сдерживается отсутствием новых эффективных проектов судов этого типа. Например, весьма востребованными остаются грузовые АСВП, в том числе, предназначенные для перевозок крупных неделимых грузов. Однако реальное предложение амфибийных судов на воздушной подушке данного назначения на рынке весьма мало или почти отсутствует. Актуальна разработка методов проектного обоснования применения в конструкции АСВП современных материалов, в первую очередь, композитов. Важной проблемой проектирования АСВП является отсутствие отработанных моделей их оптимизации, содержащих блоки эксплуатационных и экономических расчетов эффективности судов данного типа в предполагаемых условиях эксплуатации. Для расширения возможностей создания отечественных амфибийных судов на воздушной подушке, в том числе полностью или частично изготовленных из композитных материалов, 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 ряда способов проектного обоснования таких судов, учитывающих различные аспекты их последующей эксплуатации и обеспечивающих конкурентоспособность проектных решений.

В условиях рыночной экономики одной из главных задач в проектировании судов является повышение конкурентоспособности проекта судна. Это требование может быть реализовано за счет следующих мероприятий:

- обеспечения судну при проектировании повышенных, по сравнению с судами-претендентами, потребительских качеств без пропорционального повышения строительной стоимости судна и стоимости его эксплуатации;
- повышения качества проектных работ, особенно на ранних стадиях проектирования;
- уменьшения издержек на многовариантные проработки и сокращения общих сроков выработки проекта.

Современные стандарты проектирования предусматривают последовательное снижение затрат на такие наиболее дорогие и сложные разделы проекта АСВП, как разработка

аэрогидродинамического комплекса, а также прочностные расчеты, в том числе, расчеты прочности композитов. Эти разделы, как правило, реализуются на базе единожды выполненных научных исследований и накопленного опыта эксплуатации. Этими же соображениями обусловлена все более широкая замена при разработке проекта натурального эксперимента численным расчетом. При этом судно должно обладать сбалансированной совокупностью эксплуатационных качеств, отвечающих ожиданиям потенциальных заказчиков. В современных условиях быстрого технологического развития экономики весьма остро стоит вопрос об оптимизации конструкции амфибийного судна на воздушной подушке, проектирование которого ограничено ресурсами, когда у разработчика нет возможности искать наиболее эффективное решение методом проб и ошибок.

В связи с этим, представляется востребованной вариативная модель проектирования, опирающаяся на использование параметрических методов. Она позволяет проектировщику, в рамках экономической целесообразности, быстро переходить от одного размера судна к другому, связывая конструктивные элементы судна, определяющие их параметры, а также эксплуатационные характеристики судна посредством проектных ограничений, определяемых условиями эксплуатации. Накладывая и удаляя такие ограничения, а также изменяя значения параметров, разработчик может изменять элементы проектируемого судна.

В соответствии с практикой современного проектирования, разработке аван-проекта (проектного предложения) амфибийного судна на воздушной подушке, содержащего основные принципиальные решения по выбору его главных размерений, характеристик вместимости, а также полезной нагрузки, энерговооруженности, примененных аэро- и гидродинамических схем, в том числе схем гибкого ограждения и ряда других элементов, предшествует проектный анализ этих характеристик с использованием баз данных судов-претендентов.

Физической моделью способа структурно-параметрического проектирования амфибийных судов на воздушной подушке является подобие аэростатических и гидродинамических процессов на расчетных режимах движения в рамках единой компоновки всего судна, его подъемно-двигательного комплекса, а также компоновочной схемы гибкого ограждения. Подобие обусловлено относительно небольшим различием геометрических размеров наибольшего и наименьшего судов ряда (как правило, не более чем в пять раз).

Способ позволяет формализовать процессы выбора оптимальной структуры характеристик проектируемого АСВП 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 множествами технических показателей характеристик АСВП (масса, размеры, мощность и их соотношения), а также показателей качества функционального использования (эксплуатационные и экономические характеристики судна) с помощью специфических экономико-информационных и математических моделей различного типа и вида.

Основным принципом, реализуемым в способе структурно-параметрического проектирования АСВП, 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. Нижний уровень модели представляет собой систему основных проектировочных уравнений, в которые, в качестве переменных входит небольшое количество характеристик судна (параметров), к которым подстраиваются остальные [2, 5].

Непосредственному структурно-параметрическому синтезу характеристик проектируемого судна предшествует разработка базы данных. При этом проектные характеристики построенных АСВП анализируются различными способами, в том числе методами регрессионного анализа.

Задача проектирования судна имеет несколько критериев оптимизации, из которых на различных этапах анализа выбирается основной критерий, поэтому при формировании базы

данных необходимо стремиться к максимально возможному учету всех технико-экономических показателей, а также показателей функционального использования (эксплуатационных качеств построенных судов).

Параметрический ряд АСВП - 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 аэрогидродинамического 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 большое 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 позволяет создать судно с оптимальными параметрами. Более перспективным путем является построение многомерных параметрических рядов, охватывающих не только основные, но и вспомогательные параметры судна. В то же время, создание многомерных параметрических рядов судов является чрезвычайно сложной задачей и, по существу, создание оптимальных многомерных параметрических рядов судов находится на начальной стадии развития.

Проиллюстрируем изложенные соображения примером. Параметрический типовой ряд формируется из значений проектных характеристик АСВП, на основе единой компоновки подъемно-движительного комплекса и единой компоновочной схемы гибкого ограждения, поэтому проектные обоснования для всех вариантов проектируемого судна выполняются в рамках единой аэрогидродинамической схемы и компоновки, а также скоростного диапазона. Изменения проектных характеристик по интервалу основного параметра ряда устанавливаются путем анализа баз данных методами регрессионного анализа.

В настоящее время сформировались следующие основные компоновочные схемы подъемно-движительных комплексов экономичных амфибийных судов на воздушной подушке:

- подъемно-движительный комплекс в виде осевого нагнетателя или многолопастного воздушного винта, обеспечивающего тягу, с приводом от единственного двигателя. Нагнетание воздуха в воздушную подушку производится за счет обора части воздуха;
- подъемно-движительный комплекс в виде центробежного нагнетателя, обеспечивающего тягу, и нагнетание воздуха в воздушную подушку за счет обора части воздуха с приводом от единственного двигателя;
- подъемно-движительный комплекс в виде воздушного винта, обеспечивающего тягу, и осевого или центробежного нагнетателя, обеспечивающего нагнетание воздуха в воздушную подушку, объединенных единой трансмиссией с приводом от одного двигателя;
- подъемно-движительный комплекс в виде воздушного винта, обеспечивающего тягу, и осевого или центробежного нагнетателя, обеспечивающего нагнетание воздуха в воздушную подушку, с приводом от двух разных двигателей.

В настоящее время сформировались следующие основные компоновочные схемы гибких ограждений экономичных амфибийных судов на воздушной подушке:

- двухъярусная схема ограждения воздушной подушки со съёмными элементами-соплами и жестким ресивером;
- двухъярусная схема гибкого ограждения со съёмными элементами-соплами и гибким ресивером, как вариант – продольными и поперечными киями, секционирующими воздушную подушку;

- камерная схема гибкого ограждения с двумя продольными надувными скегами, а также передней и задней завесами шторного типа;
- камерная схема гибкого ограждения с тремя продольными надувными скегами, а также передней и задней завесами шторного типа;
- камерная схема гибкого ограждения с тканевой завесой по периметру, имеющей металлические элементы, обеспечивающие сохранение формы, и продольным килем, секционирующим воздушную подушку;
- одноярусная схема гибкого ограждения с гибким ресивером;
- гибридная схема гибкого ограждения с тремя надувными продольными скегами, находящимися внутри гибкого ресивера;
- схема гибкого ограждения с кольцевым надувным элементом;
- схема гибкого ограждения с кольцевым надувным элементом и центральным скегом-корпусом.

Необходимо отметить, что каждому размерному диапазону АСВП соответствуют свои компоновочные схемы подъемно-движительных комплексов и гибких ограждений воздушной подушки. При выборе размерного диапазона параметрического ряда проектировщику необходимо иметь в виду это условие.

Проектное обоснование главных размерений и других характеристик амфибийного судна на воздушной подушке выполняется при помощи изменений проектных характеристик в виде функций, устанавливающих взаимосвязь между его размерами, например,  $L_{габ}$ ,  $B_{габ}$ , соотношениями типа  $L_{габ}/B_{габ}$ , а также такими характеристиками АСВП, как полная масса  $D$ , мощность  $N$ ,  $N/D$  - энерговооруженность, водоизмещение порожнем  $D_{пор}$ , коэффициент утилизации по дедевту  $\eta$ , рассматривая значения величин грузоподъемности  $P_{гр}$ , массы топлива  $P_{топл}$ , массы экипажа  $P_{эк}$ , массы пассажиров  $P_{пасс}$ , модуля массы корпуса  $q_{корп}$ , клиренса воздушной подушки  $h$  и ряда других, по интервалу базовой длины  $L^*$ . При этом выполняется сопоставление и осуществляется выбор вариантов по экономическому критерию [3, 4].

Таблица 1

Представление параметрического ряда АСВП с использованием результатов, полученных при обработке баз данных

Характеристика	$L_1^*$	$L_2^*$	...	$L_n^*$
$L_{габ}$	$L=a_1 L_1^{*b1}$	$L=a_1 L_2^{*b1}$		$L=a_1 L_n^{*b1}$
$B_{габ}$	$B=a_2 L_1^{*b2}$	$B=a_1 L_2^{*b1}$		$B=a_2 L_n^{*b2}$
...				
$L_{ВП}$	$L_{ВП}=a_4 L_1^{*b4}$	$L_{ВП}=a_4 L_2^{*b4}$		$L_{ВП}=a_4 L_n^{*b4}$
$B_{ВП}$	$B_{ВП}=a_5 L_1^{*b5}$	$B_{ВП}=a_5 L_2^{*b5}$		$B_{ВП}=a_5 L_n^{*b5}$
$D$	$D=a_6 L_1^{*b6}$	$D=a_6 L_2^{*b6}$		$D=a_6 L_n^{*b6}$
$DW$	$DW=a_7 L_1^{*b7}$	$DW=a_7 L_2^{*b7}$		$DW=a_7 L_n^{*b7}$
$\eta$	$\eta=a_8 L_1^{*b8}$	$\eta=a_8 L_2^{*b8}$		$\eta=a_8 L_n^{*b8}$
$D_{пор}$	$D_{пор}=a_9 L_1^{*b9}$	$D_{пор}=a_9 L_2^{*b9}$		$D_{пор}=a_9 L_n^{*b9}$
$P_i$	$P_i=a_{10} L_1^{*b10}$	$P_i=a_{10} L_2^{*b10}$		$P_i=a_{10} L_n^{*b10}$
$P_j$	$P_j=a_{11} L_1^{*b11}$	$P_j=a_{11} L_2^{*b11}$		$P_j=a_{11} L_n^{*b11}$
$N$	$N=a_{12} L_1^{*b12}$	$N=a_{12} L_2^{*b12}$		$N=a_{12} L_n^{*b12}$
...				
$h$	$h=a_n L_1^{*bn}$	$h=a_n L_2^{*bn}$		$h=a_n L_n^{*bn}$

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 АСВП к основным размерам и другим характеристикам другого варианта АСВП, варьируя только один параметр  $L^*$ , как наиболее универсальный, при этом оставаясь в зоне предпочтительности (табл. 1). При по-

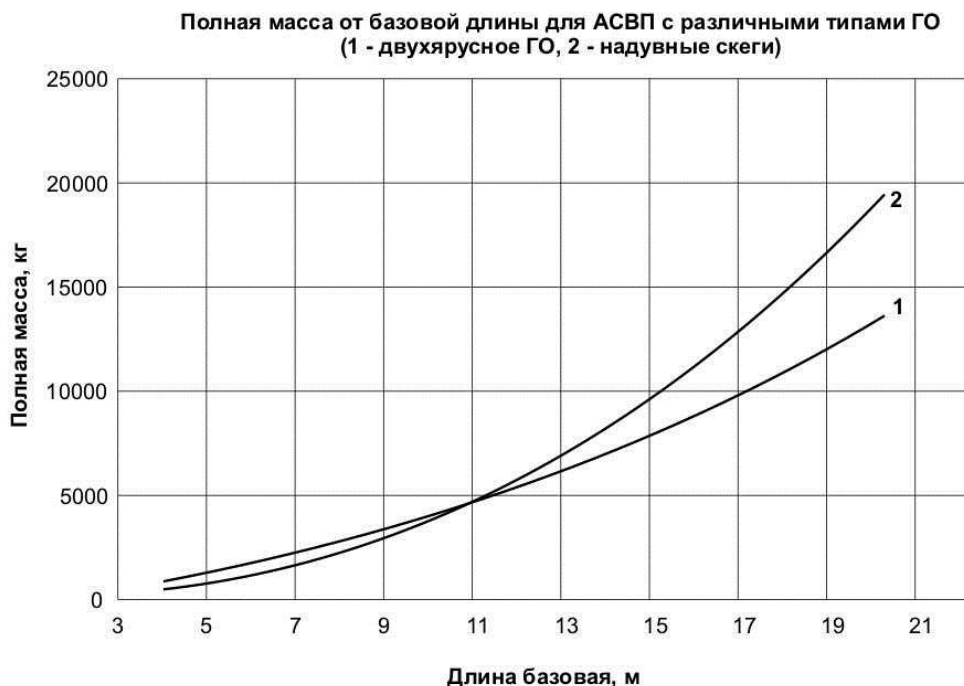
мощи вариаций по базовой длине можно получить семейство характеристик ряда АСВП, сбалансированных по соотношениям основных размеров и других характеристик, например, элементам нагрузки масс. При необходимости можно производить вариации по другим параметрам судна, предварительно задав интервал изменения и построив на них в качестве независимой переменной аналогичное семейство функций. Правильность определения значений характеристик судна, а также их сбалансированность можно контролировать при помощи интегральных показателей АСВП. В качестве интегральных показателей можно использовать такие характеристики, как расход топлива на перемещение на 1 км пути 1 т полной массы судна, 1 т полезной нагрузки судна, а также 1 пассажира. Можно использовать в качестве интегрального показателя удельную мощность, используемую для создания расчетного давления на 1 м<sup>2</sup> воздушной подушки, а также ряд других [3].

Сбалансированность проектных характеристик разрабатываемого АСВП определяется системой проектных уравнений (1). В нее входят уравнение парения на воздушной подушке, уравнение нагрузки масс и уравнение мощности [1]. При этом она представляется в виде:

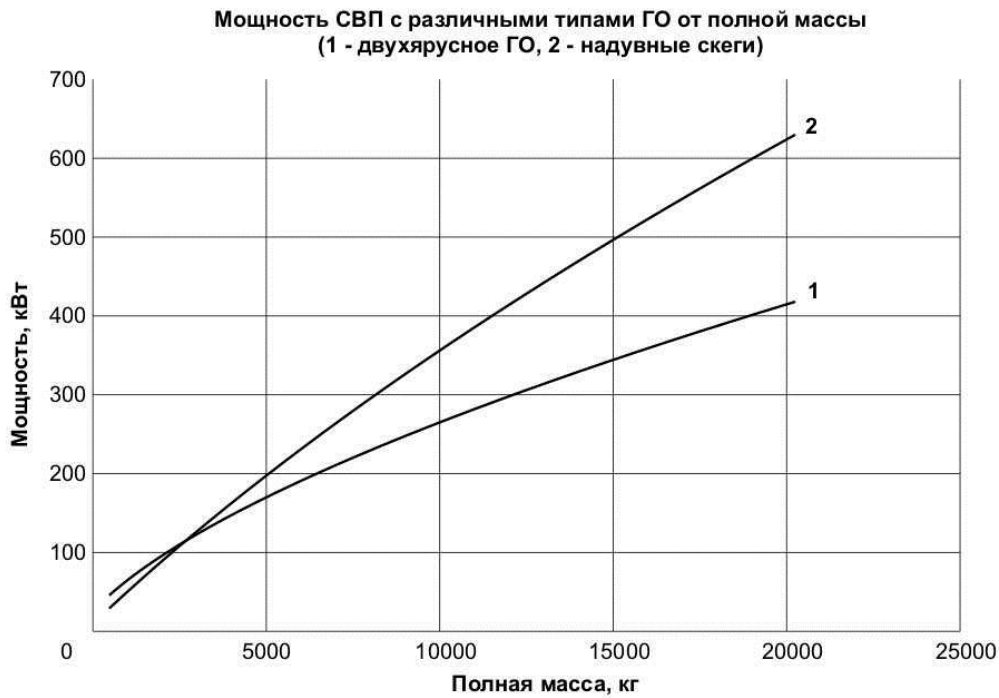
$$\begin{aligned}
 D &= f_4(L^*) = pL_{ВП}B_{ВП} = f_1(L^*)f_2(L^*)f_3(L^*), \\
 D &= f_4(L^*) = D_{пор} + DW = f_6(L^*) + f_7(L^*) = \\
 &= \sum_{i=1}^k P_i + \sum_{j=1}^l P_j = \sum_{i=1}^k f_i(L^*) + \sum_{j=1}^l f_j(L^*) \\
 N &= \frac{N}{D} D = f_4(L^*)f_5(L^*),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $f_1(L^*)$ ,  $f_2(L^*)$ ,  $f_3(L^*)$  – соответственно, значения удельного давления воздушной подушки и размеров ее гибкого ограждения,  $f_4(L^*)$ ,  $f_6(L^*)$ ,  $f_7(L^*)$  – соответственно, значения полной массы, водоизмещения порожнем и дедвейта,  $f_i(L^*)$  – значения статей нагрузки масс по разделу «Водоизмещение порожнем»,  $f_j(L^*)$  – значения статей нагрузки масс по разделу «Дедвейт», а  $f_5(L^*)$  – значения энерговооруженности, связывающего величины полной массы и мощности.

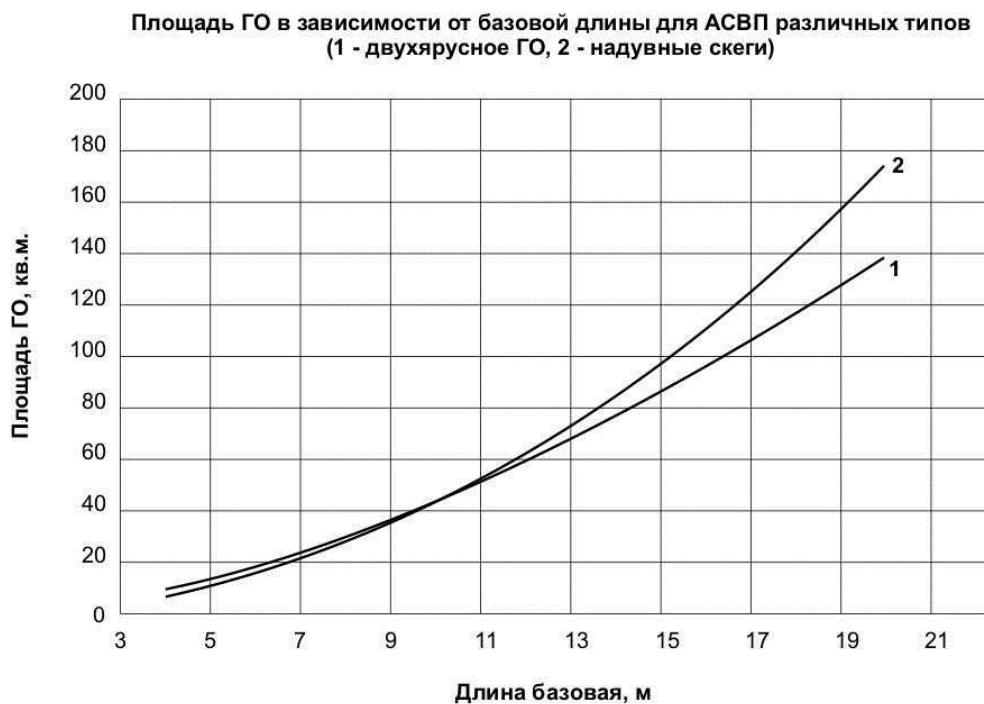
На рис. 1 – рис. 3 приведены изменения таких проектных характеристик АСВП, имеющих гибкие ограждения двухъярусной конструкции и использующих в конструкции ГО надувные скеги, как полная масса, мощность, площадь ГО, полученные в результате анализа параметрических рядов.



**Рис. 1. Изменение полной массы АКВП по интервалу базовой длины**



**Рис. 2. Изменение мощности АКВП по интервалу полной массы**



**Рис. 3. Изменение площади ГО АКВП по интервалу базовой длины**

Составляющими водоизмещения порожнем амфибийного судна на воздушной подушке, используемыми при составлении параметрического ряда, являются:

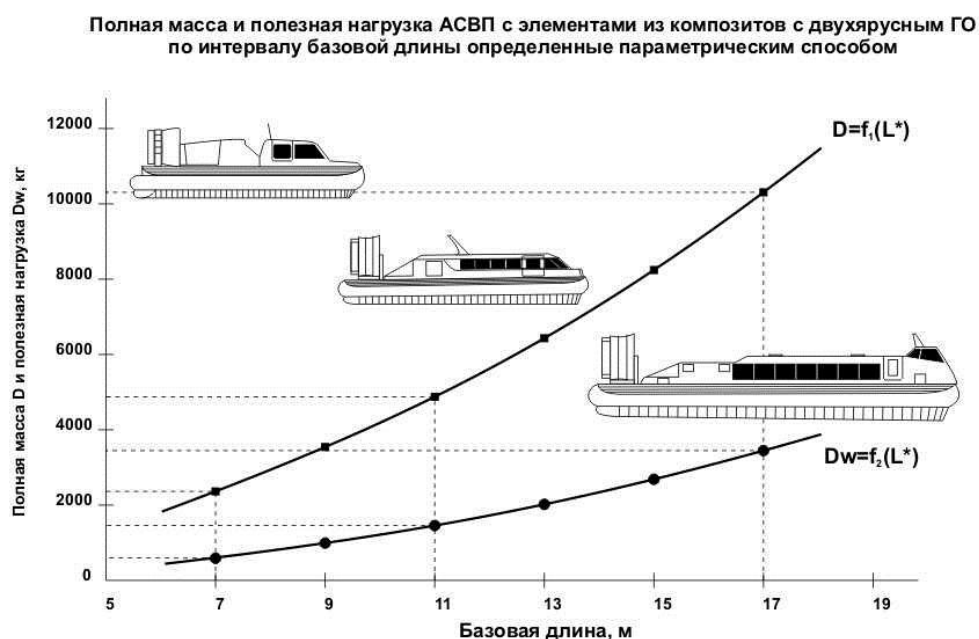
- корпус вместе с рубкой и элементами, обеспечивающими крепление гибкого ограждения, а также оборудованием помещений;
- гибкое ограждение (ГО) воздушной подушки;
- движительный комплекс с исполнительными механизмами управления;
- нагнетательный комплекс;
- судовая энергетическая установка с обслуживающими системами, электрооборудованием и трансмиссией;

- системы и устройства, которые в связи с малой массой целесообразно учитывать не отдельными статьями, а в виде поправок к нагрузке масс.

Составляющими дедевейта (полезной нагрузки) амфибийного судна на воздушной подушке, используемыми при составлении параметрического ряда, являются:

- пассажиры;
- перевозимый груз, который может быть размещен в помещениях судна;
- запас топлива;
- ЗИП, инструмент, запасы технических жидкостей и другие грузы, которые в связи с малой массой целесообразно учитывать не отдельными статьями, а в виде поправок к нагрузке масс.

Полученные выводы могут быть объяснены с точки зрения конструкции амфибийных судов на воздушной подушке. Существует определенное подобие конструктивных решений АСВП обоих типов в размерных диапазонах в части компоновки, конструкции верхних строений в виде надстройки и/или рубки, судовой энергетической установки, подъемно – двигательных комплексов и ряда других элементов судна. Известно, что для судов небольших размеров толщина корпусных конструкций определяется соображениями не столько общей, сколько местной прочности. Использование надувных скегов в конструкции ГО воздушной подушки позволяет обеспечить существенный выигрыш в массе корпуса за счет минимизации контактов корпуса с опорной поверхностью (экраном), обеспечиваемых этой схемой. Существует, также, определенный выигрыш в массе самого гибкого ограждения, за счет более простой и менее объемной конструкции по отношению к двухъярусной схеме ГО. В настоящее время реализовано несколько проектов судов с надувными элементами ограждения воздушной подушки совсем не имеющих жестких элементов корпуса.



**Рис. 4. Изменение характеристик полной массы и полезной нагрузки АСВП с двухъярусным гибким ограждением**

С ростом размеров судна необходимость обеспечения общей прочности корпуса требует увеличения размеров его связей, что приводит при определенных размерах судна к сопоставимой массе корпусных конструкций АКВП обоих типов. В то же время, необходимость обеспечения прочности надувных элементов ГО в виде скегов, находящихся в непрерывном контакте с опорной поверхностью (экраном), вызывает опережающий рост массы конструкций самого ГО.

При этом важным фактором становится меньшая, по сравнению с двухъярусной схемой гибкого ограждения воздушной подушки, эффективность схемы ГО, использующей надувные скеги. Совокупность указанных факторов находит свое отражение в соответствующем изменении характеристик нагрузки масс и энерговооруженности.

В заключение необходимо отметить, что предложенный способ структурно-параметрического проектирования амфибийного судна на воздушной подушке, полностью или частично изготовленного из композитов, 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 (см. рис. 4). После определения основных проектных характеристик АСВП разработка отдельных разделов проекта ведется традиционными методами.

#### Библиографический список

1. Демешко, Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные суда на воздушной подушке / Г.Ф. Демешко. – СПб., 1992. – 598 с.
2. Пашин, В.М. Оптимизация судов / В.М. Пашин. – Л.: Судостроение, 1983. – 286 с.
3. Францев, М.Э. Анализ эксплуатационных и экономических аспектов в модели проектной оптимизации амфибийных катеров на воздушной подушке, предназначенных для перевозки пассажиров. / М.Э. Францев // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 2. С. 179–184.
4. Францев, М. Э. Способ проектного обоснования главных элементов и других характеристик судов из композиционных материалов при помощи анализа баз данных / М. Э. Францев // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2011. № 3. С. 37–47.
5. Царев, Б.А. Оптимизационное проектирование скоростных судов / Б.А. Царев. – Л.: ЛКИ, 1988. – 102 с.

*Дата поступления  
в редакцию 03.02.2014*

**М.Е. Frantsev**

### THE PARAMETRIC METHODS HAVE USED IN THE EARLY STAGES OF PROJECT DEVELOPMENT OF HOVERCRAFT FROM COMPOSITES

CJSC “Neptun-Sudomontaj”

**Purpose:** The use of parametric methods to determine the main characteristics of high-speed vessels in the early stages of design.

**Methodology/approach:** The physical model of the structural method of parametric design for amphibious hovercrafts is based on a similarity of aerodynamic and hydrodynamic processes for modes of movement within a single type series of the vessels.

**Findings:** The method allows to formalize the processes of selecting the optimal structure of characteristics for hovercrafts which developed on base of methodological generality analyze information on design of previously built ships of this type and synthesis studies.

**Research limitations/implications:** The method is limited to a relatively small difference in the geometric dimensions for the largest and smallest of the type series of vessels.

**Originality:** The way of structural parametric design of hovercraft which wholly or partly made from composites, allows getting a significant gain for the cost of the initial phase of exploratory research of project.

*Key words:* parametric methods, design of amphibious hovercrafts, composites.