

О ПРИМЕНЕНИИ ЧАСТНЫХ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ КОНЦЕПЦИИ СУДОВ С АУТРИГГЕРАМИ

О. И. Соломенцев, проф., д-р техн. наук;
Л. С. Теляга, магистрант

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Рассмотрено применение частных целевых функций для уточнения главных элементов судов с аутриггерами на стадии исследования их концепции. Выполнены простейшие оптимизационные расчеты и предложены обобщенные графики для определения характеристик удлинения и отношения ширины к осадке для этих судов.

Ключевые слова: судно с аутриггерами, частная целевая функция, выбор главных элементов, условия ходкости.

Анотація. Розглянуто застосування частинних цільових функцій для уточнення головних елементів суден з аутриггерами на стадії дослідження їхньої концепції. Виконано найпростіші оптимізаційні розрахунки і запропоновано узагальнені графічні матеріали для визначення характеристик подовження та відношення ширини до осадки для цих суден.

Ключові слова: судно з аутриггерами, часткова цільова функція, вибір головних елементів, умови швидкохідності

Abstract. The usage of the partial criterion functions is presented for the determining of the outrigger ships main characteristics on the stage of their concept exploration. The simple optimization calculations are made and general graphic materials are given for defining the characteristics of prolongation and dependence of the width to the draught for these ships.

Keywords: outrigger ship, partial criteria, determination of the main characteristics, ship speed.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В последние годы большой интерес проявляется к проектированию и строительству судов с аутриггерами. Это такие трехкорпусные суда, у которых боковые корпуса намного меньше центрального. Уже построены английское экспериментальное судно с аутриггерами «Triton», австралийский автомобильно-пассажирский паром «Benchjigua Express» и южнокорейское судно того же класса «Dolphin Ulsan». Введен в строй

американский фрегат с аутриггерами для действий у побережья противника «Independence» и строится второй такой же корабль «Coronado». Разрабатывается и ряд новых проектов судов этого архитектурно-конструктивного типа. Практически все построенные и проектируемые суда с аутриггерами относятся к высокоскоростным.

В этом случае актуальной оказывается проблема определения главных элементов таких судов. Если задание на

проектирование подготовлено (внешняя задача проектирования решена), то определение главных элементов судна (внутренняя задача проектирования) включает в себя этапы исследования, развития и обоснования его концепции [15]. На этапе исследования концепции выполняется предварительное (в начальном приближении) определение главных элементов проектируемого судна методами классической теории проектирования судов. Кроме того, оказывается необходимым наличие обобщенных графических и аналитических материалов для определения безразмерных характеристик формы корпуса проектируемого судна.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Определение главных элементов судов с аутриггерами для стадии исследования их концепции рассмотрено в работе [11] в 2001 г. В том же году вышла и обзорная работа В.А. Дубровского [5], где также анализируются отдельные аспекты выбора главных элементов этих судов. Ряд важных результатов, которые будут использованы в дальнейшем, содержится в исследованиях южнокорейских специалистов [14]. Однако в указанных работах за основу приняты статистические методы. В то же время соответствующие исходные статистические выборки недостаточно полны, а опыт проектирования судов с аутриггерами, на основе которого можно было бы откорректировать полученные на стадии исследования концепции статистические результаты, невелик. Одним из путей получения более адекватных и достоверных обобщенных формул и графиков указанного типа является применение на этапе исследования концепции частных целевых функций [3, 6, 7,

10, 15]. Под минимизацией частной целевой функции может пониматься либо минимизация потребной мощности, либо максимизация полезной нагрузки при постоянном водоизмещении. Применительно к выбору относительной длины одного корпуса среднескоростного катамарана $\tilde{l}_1 = L/\sqrt[3]{\tilde{V}_1}$ подобная задача решалась в работах [6, 10] (здесь \tilde{V}_1 — объемное водоизмещение одного корпуса катамарана, а L — его длина). Применительно к определению отношения ширины одного корпуса B_1 катамарана к осадке T эта же задача решалась в работе [7].

При этом в общем случае, как для однокорпусных, так и для двухкорпусных судов, имеем [3, 6, 7]

$$\tilde{l}_1 = \tilde{l}_1\left(D, \delta, \frac{B_1}{T}, v\right) \text{ или } \tilde{l}_1 = \tilde{l}_1\left(D, \delta, \frac{B_1}{T}, Fr\right);$$

$$\frac{B_1}{T} = \frac{B_1}{T}(D, \tilde{l}_1, \delta, Fr); D = 2\rho g \tilde{V}_1; Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}},$$

где D , δ — весовое водоизмещение и коэффициент общей полноты однокорпусного судна или катамарана; ρ — плотность воды; v — скорость хода; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; Fr — число Фруда по длине.

Если учитывать полученные по методу частных целевых функций зависимости \tilde{l}_1 и B_1/T от всех указанных выше параметров, то этот метод может быть применен только для уточнения результатов расчета на стадии исследования концепции для конкретного задания на проектирование [3, 15]. В то же время многолетняя практика проектирования традиционных однокорпусных судов позволяет на основании статистических данных с достаточной точностью принимать, что $\tilde{l}_1 \approx \tilde{l}_1(v)$ или $\tilde{l}_1 \approx \tilde{l}_1(Fr)$, тогда как зависимость относительной длины от прочих указанных выше факторов менее существенна [2, 3]. Тот же результат при применении метода частных целевых функций был получен для среднескоростных катамаранов

в [6, 10]. Аналогично и для определения отношения ширины к осадке по методу частных целевых функций для среднескоростных катамаранов в работе [7] было получено $\frac{B_1}{T} \approx \frac{B_1}{T}(\delta, Fr)$, тогда как зависимости B_1/T от D и \tilde{l}_1 мало существенны.

В этих случаях проектант отходит от конкретного задания на проектирование и на основе применения частной целевой функции получает обобщенные графики и формулы, позволяющие на стадии исследования концепции наметить целесообразные значения относительной длины и отношения ширины к осадке. Такие графики и формулы будут более достоверными по сравнению со статистическими зависимостями. Предназначены эти графики и формулы для того, чтобы после решения уравнений весов (масс) и объемов судна найти коэффициенты полноты, безразмерные характеристики формы корпуса, а затем — и абсолютные значения главных размерений.

ВЫДЕЛЕНИЕ НЕРЕШЕННЫХ ЧАСТЕЙ ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМЫ

Из сказанного следует, что реализация изложенного в работах [6, 7, 10] подхода для судов с аутриггерами представляется *актуальной*.

Для катамаранов и для судов с аутриггерами общим является то, что для них, в отличие от однокорпусных судов, выбор характеристики удлинения (относительного удлинения или относительной длины), а также отношения ширины корпуса к осадке никак не связан с требованиями обеспечения устойчивости. В обоих случаях устойчивость обеспечивается наличием более чем одного корпуса и правильным выбором расстояния между ними. Удлинение корпуса и отношение ширины корпуса к его осадке в обоих случаях определяются в первую очередь требованиями ходко-

сти, а при определении удлинения дополнительно следует учитывать и возможное возрастание массы корпуса.

Однако между катамаранами и судами с аутриггерами есть и одно важное различие. Как известно, продольная качка судна на реальном морском волнении заданной интенсивности при движении на встречных курсовых углах будет тем слабее, чем оно длиннее [4]. В последние годы это обстоятельство вызвало в Голландии появление концепции «увеличенного судна» (Enlarged Ship). В этом случае водоизмещение и длина судна принимаются большими, чем оказывается минимально необходимым из уравнений масс и вместимости. Такое решение принимается с целью улучшения мореходности, а с некоторыми экономическими потерями приходится мириться [18]. При переходе от традиционного судна к катамарану того же водоизмещения удлинение двух корпусов может заметно возрасти по сравнению с удлинением одного исходного корпуса, но абсолютное значение длины не увеличивается и может даже уменьшиться. Поэтому заметных преимуществ в этом отношении при переходе от однокорпусного судна к катамарану не получается. При переходе от традиционного судна к судну с аутриггерами возрастет не только удлинение корпуса, но и его абсолютная длина. Характеристики мореходности на встречном волнении улучшатся, причем, в отличие от применения концепции Enlarged Ship для традиционного судна, экономических потерь здесь можно избежать. Поэтому если при определении удлинения корпуса катамарана на стадии исследования концепции можно ограничиться только требованиями в части ходкости и массы корпуса, то для судов с аутриггерами целесообразно дополнительно рассмотреть и требования в части мореходности на встречном волнении.

ЦЕЛЮЮ РАБОТЫ является разработка методики практического применения частных целевых функций для уточнения главных элементов судов с аутриггерами на стадии исследования их концепции. В результате будут получены графические и аналитические зависимости для предварительного выбора их характеристик удлинения и отношения ширины к осадке.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА РАБОТЫ

Предположим, что, имея задание на проектирование судна с аутриггерами, из решения уравнения масс определили его объемное водоизмещение V , а также задались объемным водоизмещением центрального корпуса V_1 и аутриггера V_2 , $V = V_1 + 2V_2$ [11]. Здесь при отсутствии иных соображений можно принимать $V_2 \approx 0,05V$ [11]. Из уравнения масс определяем зависимость

$$D = D(\bar{Q}, v, L_R, P_n),$$

где P_n — масса полезной нагрузки; L_R — дальность плавания; \bar{Q} — вектор измерителей.

Далее в рамках стадии исследования концепции необходимо найти коэффициент общей полноты δ_1 и соотношения главных размерений, а затем и абсолютные значения главных размерений для центрального корпуса и аутриггера. Для скоростных судов представляется возможным зафиксировать коэффициент общей полноты центрального корпуса δ_1 , приняв его равным примерно 0,5. Для определения характеристик удлинения и отношения ширины центрального корпуса к осадке рассмотрим простейшее уравнение масс в такой форме:

$$\begin{aligned} M &= \frac{D}{g} = \rho V = P_{KL} + \Delta P_K + P_M + P_T + P_n; \\ V &= V_1 + 2V_2; P_{KL} = q_{KL} \bar{M}_{KL}; \\ P_M &= q_M N; \\ P_T &= q_T \frac{L_R}{v} N, \end{aligned}$$

где M — полная масса судна с аутриггерами; P_{KL} — часть массы корпуса, зависящая от длины (масса продольных связей, формирующих эквивалентный брус); $q_{KL} \in \bar{Q}$, \bar{M}_{KL} — измеритель и модуль пересчета статьи нагрузки P_{KL} ; ΔP_K — часть массы корпуса, не зависящая от длины; P_M, P_T — массы механизмов и топлива; N — мощность главных двигателей; $q_M \in \bar{Q}$ — измеритель массы механизмов по модулю N ; $q_T \in \bar{Q}$ — удельный расход топлива.

Если размеры продольных связей судна с аутриггерами не определяются общей продольной прочностью, то допустимо принимать модуль пересчета массы корпуса в виде $\bar{M}_{KL} = \bar{M}'_{KL} = \Omega_{HO1}$, где Ω_{HO1} — площадь наружной обшивки центрального корпуса [6]. Если размеры продольных связей определяются общей продольной прочностью [9], то $\bar{M}_{KL} = \bar{M}''_{KL} = \delta_1^{4/3} L_1^n B_1 \frac{T_1}{H_{np}}$ и теоретически из условий общей продольной прочности получается, что $n = 3$ (здесь L_1, B_1, T_1 — длина, ширина и осадка, а H_{np} — приведенная (осредненная по длине) высота борта центрального корпуса). На практике в этом случае по статистическим регрессионным зависимостям получается $1,5 \leq n \leq 3,0$.

Далее будем считать, что всегда $M_{KL} = K_\Omega \Omega_1$ и $P_{KL} = q_{KL} K_\Omega \Omega_1$, где Ω_1 — площадь смоченной поверхности центрального корпуса. В то же время параметрам q_{KL} и K_Ω может придаваться различный смысл в зависимости от того, не определяются (один штрих) или определяются (два штриха) размеры продольных связей центрального корпуса судна с аутриггерами общей продольной прочностью. В первом случае

$$\begin{aligned} q_{KL} &= q'_{KL}; K_\Omega = K'_\Omega = \\ &= \frac{\bar{M}'_{KL}}{\Omega_1} = \frac{\Omega_{HO1}}{\Omega_1} \neq K'_\Omega \left(\frac{L_1}{B_1} \right) \neq K'_\Omega(l_1); \\ P_{KL} &= q'_{KL} \bar{M}'_{KL} = q'_{KL} \Omega_{HO1} = q'_{KL} K'_\Omega \Omega_1, \end{aligned}$$

во втором случае

$$q_{KL} = q_{KL}''; K_{\Omega} = K_{\Omega}'' =$$

$$= \frac{\bar{M}_{KL}''}{\Omega_1} = \frac{\delta_1^{4/3} L_1^3 B_1 T_1}{\Omega_1 H_{\text{пр}}} \sim L_1^2 \sim \left(\frac{L_1}{B_1}\right)^2 B_1^2 \sim l_1^2;$$

$$P_{KL} = q_{KL}'' \bar{M}_{KL}'' = q_{KL}'' K_{\Omega}'' \Omega_1.$$

Условию максимизации полезной нагрузки при постоянном водоизмещении будет отвечать минимизация частной целевой функции такого вида:

$$\mathfrak{Z} = P_M + P_T + P_{KL} =$$

$$= N \left(q_M + q_T \frac{L_R}{v} \right) + q_{KL} K_{\Omega} \Omega_1.$$

Далее обозначим:

$$\frac{\mathfrak{Z}}{V_1^{2/3} \left(q_M + q_T \frac{L_R}{v} \right)} = f.$$

Тогда, минимизируя функцию f , можно найти вариантным методом такую комбинацию $\frac{L_1}{B_1} - \frac{B_1}{T_1}$, которая отвечала бы максимуму полезной нагрузки $P_{\text{п}}$ при заданном полном водоизмещении. При этом каждому текущему значению L_1/B_1 и B_1/T_1 при фиксированных D_1 , δ_1 и B_1/T_1 отвечает своя комбинация абсолютных значений главных размерений центрального корпуса L_1 , B_1 , T_1 . Эти величины определяются из уравнения плавучести:

$$\left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1} \right) = \sqrt[3]{\frac{V_1}{\delta_1 \cdot \frac{L_1}{B_1} \cdot \left(\frac{B_1}{T_1} \right)^2}}; \quad (1)$$

$$B_1 \left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1} \right) = T_1 \left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1} \right) \cdot \frac{B_1}{T_1} = \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \frac{B_1}{T_1}}{\delta_1 \cdot \frac{L_1}{B_1}}}; \quad (2)$$

$$\left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1} \right) = B_1 \left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1} \right) \cdot \frac{L_1}{B_1} =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{V_1 \cdot \frac{B_1}{T_1} \left(\frac{L_1}{B_1} \right)^2}{\delta_1}}. \quad (3)$$

Можно искать тем же способом отвечающую максимальной полезной нагрузке комбинацию $l_1 - \frac{B_1}{T_1}$, $l_1 = \frac{L_1}{\sqrt[3]{V_1}}$. Каждой такой комбинации также отвечает своя, определяемая из уравнения плавучести, комбинация абсолютных значений главных размерений центрального корпуса L_1 , B_1 и T_1 :

$$T_1 \left(l_1, \frac{B_1}{T_1} \right) = \frac{\sqrt[3]{V_1}}{\sqrt{\delta_1 \cdot l_1 \cdot \frac{B_1}{T_1}}}; \quad (4)$$

$$B_1 \left(l_1, \frac{B_1}{T_1} \right) = T_1 \left(l_1, \frac{B_1}{T_1} \right) \cdot \frac{B_1}{T_1} =$$

$$= \sqrt[3]{V_1} \cdot \sqrt{\frac{1}{\delta_1 \cdot l_1} \cdot \frac{B_1}{T_1}}; \quad (5)$$

$$L_1 = l_1 \sqrt[3]{V_1} \neq L_1 \left(\frac{B_1}{T_1} \right). \quad (6)$$

Далее необходимо связать мощность N , а следовательно, и полное сопротивление воды движению судна с аутриггерами $R = R_R + R_F$ с величинами L_1/B_1 и B_1/T_1 (или с l_1 и B_1/T_1). Расчет вязкостного сопротивления (фактически сопротивления трения, роль сопротивления формы в данном случае невелика) с известными из теории ходкости надбавками R_F затруднений не представляет. Остаточное сопротивление судна с аутриггерами R_R вычисляется как

$$R_R = (R_{R1} + 2R_{R2})(1 + K_R),$$

где R_R , R_{R2} — остаточное сопротивление центрального корпуса и аутриггера, определенное как для однокорпусных судов, а K_R — поправка на взаимодействие центрального корпуса и аутриггеров [16].

Здесь поправка K_R зависит только от числа Фруда $Fr_1 = v/\sqrt{gL_1}$, отношения выдвиг центрального корпуса к его длине и отношения горизонтального клиренса к его ширине, но не зависит от соотношений главных размерений

и коэффициентов полноты центрального корпуса и аутриггера [16]. А это означает, что чем ниже зависящие только от характеристик центрального корпуса и аутриггера величины R_{R1} и R_{R2} , тем меньше будет и суммарное остаточное сопротивление R_R . Ситуация, когда выгодно увеличивать R_{R1} и R_{R2} , потому что это приведет к значительному уменьшению K_R и к итоговому снижению R_R , из рассмотрения исключается. Кроме того, в соответствии с данными работы [14] величина R_R в значительной мере определяется значением величины R_{R1} , и снижению величины R_{R1} , на основе данных модельных испытаний, и должно быть уделено основное внимание.

Данные систематической серии по судам с аутриггерами [16] отвечают узкому скоростному диапазону, а прочие систематические серии по судам с аутриггерами авторам неизвестны.

$$\left(\frac{L_1}{B_1}\right)_0 = \arg \min_{\frac{L_1}{B_1}} f_1\left(\text{Fr}_1, \frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1}\right); \left(\frac{B_1}{T_1}\right)_0 = \arg \min_{\frac{B_1}{T_1}} f_1\left(\text{Fr}_1, \frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1}\right);$$

$$f_1\left(\text{Fr}_1, \frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1}\right) = \frac{\rho v^3 \bar{\Omega}_1}{2\eta_{\text{пр}}\left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1}\right)} \left[C_{R0}(\text{Fr}_1) \Psi_{\frac{L_1}{B_1}} \Psi_{\frac{B_1}{T_1}} + K_F C_F \right] + \frac{q_{KL} K_{\Omega} \bar{\Omega}_1}{q_M + q_T} \frac{L_R}{v}; \quad (7)$$

$$\bar{\Omega}_1\left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1}\right) = 5,0 + 0,074 \frac{L_1}{B_1} \frac{B_1}{T_1} + \frac{0,25}{\delta_1} \left(6,0 - \frac{B_1}{T_1}\right) (0,7 - \delta_1) \approx$$

$$\approx 5,0 + 0,074 \frac{L_1}{B_1} \frac{B_1}{T_1} + 0,083 \left(6,0 - \frac{B_1}{T_1}\right),$$

где C_{R0} — коэффициент остаточного сопротивления центрального корпуса с безразмерными характеристиками формы

$$L_1/B_1 = 11, B_1/T_1 = 3$$

при $\text{Fr}_1 \leq 0,5$ и

$$L_1/B_1 = 15, B_1/T_1 = 3,275$$

при $0,5 \leq \text{Fr}_1 \leq 0,75$ [1]; $\eta_{\text{пр}}(L_1/B_1, B_1/T_1)$ — пропульсивный коэффициент как функция отношений L_1/B_1 и B_1/T_1 ; $\Psi_{\frac{L_1}{B_1}}$, $\Psi_{\frac{B_1}{T_1}}$ — поправки на отклонение соответствующих

главных элементов от тех, при которых вычислялся коэффициент остаточного сопротивления C_{R0} [1]; C_F, Re — коэффициент сопротивления трения технически гладкой пластины и число Рейнольдса; $K_F \approx 1,1 \dots 1,2$ — поправка на шероховатость, воздушное сопротивление и выступающие части.

Поэтому обратимся к известным в литературе систематическим сериям по экспериментальному определению остаточного сопротивления воды движению скоростных катамаранов [1, 8], поскольку именно характеристики этих серий отвечают характеристикам центрального корпуса судна с аутриггерами. В первом случае остаточное сопротивление определяется в функции $\text{Fr}_1 = \frac{v}{\sqrt{gL_1}}$, L_1/B_1 , $\delta_1 \approx 0,525$ и B_1/T_1 , $0 \leq \text{Fr}_1 \leq 0,75$, а во втором — в функции Fr_1 , l_1 и B_1/T_1 , $0,4 \leq \text{Fr}_1 \leq 1,0$.

Тогда поиск оптимальной по полезной нагрузке комбинации $\frac{L_1}{B_1} - \frac{B_1}{T_1}$ сведется к минимизации функции $f = f_1\left(\frac{L}{B_1}, \frac{B_1}{T}\right)$, так что при $\delta_1 \approx 0,52$ будем иметь [1]:

Поиск оптимальной по полезной нагрузке комбинации $l_1 - B_1/T_1$ сведется к минимизации функции $f = f_2(l_1, B_1/T)$:

$$l_{10} = \arg \min_{l_1} f_2 \left(Fr_1, l_1, \frac{B_1}{T_1} \right); \quad \left(\frac{B_1}{T_1} \right)_0 = \arg \min_{\frac{B_1}{T_1}} f_2 \left(Fr_1, l_1, \frac{B_1}{T_1} \right);$$

$$f_2 \left(Fr_1, l_1, \frac{B_1}{T_1} \right) = \frac{\rho v^3 \bar{\Omega}_1}{2\eta_{\text{ПР}} \left(l_1, \frac{B_1}{T_1} \right)} \left[C_R \left(Fr_1, \frac{l_1}{\sqrt[3]{2}}, \frac{B_1}{T_1} \right) + K_F C_F \right] + \frac{q_{\text{KL}} K_{\Omega} \bar{\Omega}_1}{q_M + q_T} \frac{L_R}{v}; \quad (8)$$

$$\bar{\Omega}_1 = \frac{\Omega_1}{V^{2/3}}; \quad \Omega_1 = 2,6\sqrt{V_1 L_1} + 3,5; \quad V_1 - \text{в м}^3; \quad L_1 - \text{в м}; \quad \Omega_1 - \text{в м}^2; \quad \sqrt{V_1 L_1} \leq 175 \text{ м}^2,$$

где $C_R \left(Fr_1, \frac{l_1}{\sqrt[3]{2}}, \frac{B_1}{T_1} \right)$ — коэффициент остаточного сопротивления для изолированного центрального корпуса корабля с аутригерами, выраженный как функция величин $Fr_1, l_1, B_1/T_1$ в соответствии с графическими и табличными зависимостями [8].

Коэффициенты остаточного сопротивления в экспериментах [8] выражены в функции относительной длины катамарана $l = \frac{L}{\sqrt[3]{V}}$. Поэтому и появляется сомножитель $\frac{1}{\sqrt[3]{2}}$ при относительной длине l_1 . Эта величина связана с относительной длиной одного кор-

пуса катамарана $\tilde{l}_1 = \frac{L}{\sqrt[3]{\tilde{V}}}$, $\tilde{V} = 2V_1$ как $l = \frac{\tilde{l}_1}{\sqrt[3]{2}}$ (здесь \tilde{L} — длина катамарана).

При переходе от катамарана к судну с аутригерами имеем $l_1 = \tilde{l}_1$.

Кроме того, искать параметры L_1/B_1 и B_1/T_1 (или l_1 и B_1/T_1) можно также и из минимизации соответствующей доли ресурсного показателя — для этого достаточно ввести в формулы (7), (8) для частных целевых функций f_1 и f_2 коэффициенты, определяющие соотношение между стоимостями корпуса, механизмов и топлива. В этом случае вместо целевых функций f_1 и f_2 минимизируются целевые функции F_1 и F_2 :

$$F_1 \left(Fr_1, \frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1} \right) = \frac{\rho v^3 \bar{\Omega}_1}{2\eta_{\text{ПР}} \left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1} \right)} \left[C_{R0}(Fr_1) \Psi_{\frac{L_1}{B_1}} \Psi_{\frac{B_1}{T_1}} + K_F C_F \right] + \frac{q_{\text{KL}} K_{\Omega} \bar{\Omega}_1}{C_{\text{KM}} q_M + C_{\text{KT}} q_T} \frac{L_R}{v}; \quad (9)$$

$$F_2 \left(Fr_1, l_1, \frac{B_1}{T_1} \right) = \frac{\rho v^3 \bar{\Omega}_1}{2\eta_{\text{ПР}} \left(l_1, \frac{B_1}{T_1} \right)} \left[C_R \left(Fr_1, \frac{l_1}{\sqrt[3]{2}}, \frac{B_1}{T_1} \right) + K_F C_F \right] + \frac{q_{\text{KL}} K_{\Omega} \bar{\Omega}_1}{C_{\text{KM}} q_M + C_{\text{KT}} q_T} \frac{L_R}{v}, \quad (10)$$

где $C_{\text{KM}}, C_{\text{KT}}$ — отношение стоимостей единиц массы механизмов и топлива к единице массы корпуса.

Тогда при заданном водоизмещении полезная нагрузка в общем случае уже не будет минимальной. Тем не менее, комбинация $L_1/B_1 - B_1/T_1$ (или l_1 и B_1/T_1) может оказаться ближе к фактическому оптимуму, который в данном случае будет отвечать минимизации уже не полезной нагрузки, а ресурсного показателя.

Если движители расположены в аутригерах, то в формулах (7)–(10) принимается $\eta_{\text{ПР}} \left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1} \right) \equiv 1$, и только если движители размещены в центральном корпусе, то учитывается фактическая

зависимость $\eta_{\text{ПР}} = \eta_{\text{ПР}} \left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1} \right)$. Как известно, в общем случае $\eta_{\text{ПР}} = \eta_{\text{к}} \eta_{\text{в}} \eta_{\text{п}}$, где $\eta_{\text{к}}$ — коэффициент влияния корпуса;

η_B — КПД двигателя и η_{Π} — КПД передачи. С достаточной точностью можно принять, что $\eta_K \neq \eta_{\Pi} \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right)$ и $\eta_{\Pi} \neq \eta_{\Pi} \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right)$. Здесь $l = \frac{L_1}{B_1}$ в первом случае и $l = l_1$ во втором. А вот зависимость $\eta_B = \eta_B \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right)$ иногда оказывается существенной. Это объясняется тем, что с ростом B_1/T_1 снижается, при прочих равных условиях, осадка T_1 , а значит, и существенно влияющий на КПД η_B диаметр гребного винта D_B . Тогда вместо зависимости $\eta_{\Pi} = \eta_{\Pi} \left(\frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1} \right)$ в соотношениях (7), (8) при расположении двигательного комплекса в центральном корпусе будем пользоваться зависимостью $\eta_B = \eta_B \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right) = \eta_B \left[T_1 \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right) \right]$. Зависимость $T_1 = T_1 \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right)$ задается соотношением (1) при $l = L_1/B_1$ или соотношением (4) при $l = l_1$.

Далее найдем зависимость

$$\eta_B = \eta_B \left[T_1 \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right), R \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right) \right].$$

При этом в формулы (7), (8) вместо функции $\eta_B \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right)$ должна подставляться зависимость $\eta_B \left[T_1 \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right), R \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right) \right]$. Здесь R — полное сопротивление воды движению судна с аутриггерами. В данном случае при определении КПД двигателя с достаточной точностью допустимо принять [14]

$$\begin{aligned} R &\approx \kappa_R R_1; \\ \kappa_R &\approx 0,79 + 0,6Fr_1; Fr_1 \leq 0,35; \\ \kappa_R &\approx 1,0 + 0,5(Fr_1 - 0,35); 0,35 \leq Fr_1 \leq 0,55; \\ \kappa_R &\approx 1,1; Fr_1 \geq 0,55; \end{aligned}$$

где R_1 — полное сопротивление воды движению центрального корпуса судна с ау-

триггерами, определяемое в соответствии с ранее полученными результатами.

Определяя КПД η_B для гребных винтов, примем, что оба коэффициента взаимодействия винта с корпусом равны 0. Можно записать:

$$\eta_B = \eta_{BT}(T_1, R); \frac{T_1}{K_T} \leq D_{B0};$$

$$\eta_B = \eta_{Bmax} = \eta_{BT}(K_T D_{B0}, R); \frac{T_1}{K_T} \geq D_{B0},$$

где диаметр оптимального гребного винта D_{B0} и КПД винта η_{BT} при диаметре винта $D_B < D_{B0}$ определялись для кавитирующих и для некавитирующих винтов по известным приближенным формулам.

Коэффициент K_T здесь задает соотношение между осадкой центрального корпуса T_1 и диаметром винта D_B : $K_T = T_1/D_B$. Если $D_B < D_{B0}$, то $K_T \approx 1,2 \dots 1,4$. Если же можно разместить винт диаметром $D_B > D_{B0}$, то делать этого не следует (это приведет к значительному снижению КПД). В этом случае надо принять $D_B = D_{B0}$ и тогда будет $K_T = \frac{T_1}{D_{B0}} > (1,2 \dots 1,4)$.

Пусть теперь в качестве двигателей, которые размещены в центральном корпусе, применяются водометы. Судя по имеющимся данным в части опыта проектирования скоростных катамаранов, критичной с точки зрения размещения водомета оказывается уже не осадка T_1 , а ширина центрального корпуса B_1 [13]. Как и ранее, вместо зависимости $\eta_{\Pi} \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right)$ будем подставлять в формулы (7)–(10) зависимость $\eta_{ВД} \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right)$, где $\eta_{ВД}$ — КПД водомета. Здесь можно считать, что $\eta_{ВД} = \eta_{ВД} \left[B_1 \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right); R \left(l, \frac{B_1}{T_1} \right) \right]$. Для зависимости $B_1(l, B_1/T_1)$ можно использовать соотношения (2) при $l = L_1/B_1$

и (5) при $l = l_1$. Для КПД водомета $\eta_{ВД}$ можно записать [12]:

$$\eta_{ВД} = \eta_{ВДВ}(B_1, R); \frac{B_1}{K_B} \leq D_{ВД0};$$

$$\eta_{ВД} = \eta_{ВД\max} = \eta_{ВДВ}(K_B D_{ВД0}, R);$$

$$\frac{B_1}{K_B} \geq D_{ВД0}; \eta_{ВДВ} = \eta_C(B_1, R)\eta_H,$$

где КПД насоса $\eta_H \approx 0,8...0,85$, а диаметр оптимального по КПД рабочего колеса водомета $D_{ВД0}$ и КПД струи η_C определяются по данным справочника [12].

Предположим, что в центральном корпусе корабля с ауриггерами расположен пропульсивный комплекс типа WARP, включающий в себя водомет для полного хода и два гребных винта для экономического хода [17]. Тогда в зависимости (7)–(10) подставляется приведенный пропульсивный коэффициент

$$\eta_{\text{пр}}^* = \lambda \eta_{ВД}(T, R_3) + (1 - \lambda) \eta_{ВД}(B_1, R),$$

где λ — весовой коэффициент, назначаемый путем экспертной оценки и отражающий представления проектанта о важности для проектируемого корабля режимов экономического и полного хода, $0 \leq \lambda \leq 1$; R_3, R — сопротивление воды движению корабля с ауриггерами при движении экономическим и полным ходом соответственно.

Однако при этом сопротивление воды движению при формировании функций $f_1 - f_2$ (или $F_1 - F_2$) вычисляется для скорости полного хода.

По результатам расчетов могут быть сделаны такие основные выводы.

1. Оптимальные значения относительного удлинения центрального корпуса $\left(\frac{L_1}{B_1}\right)_0$ и его относительной длины l_{10} уменьшаются с ростом параметра n . Этот результат вполне закономерен: чем больше величина n , тем в большей степени рост длины увеличивает массу корпуса и уменьшает (при остоянном водоизмещении) полезную нагрузку.

2. Зависимости величин $\left(\frac{L_1}{B_1}\right)_0$ и l_{10}

от числа Фруда Fr_1 отражают зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда. Максимум этого коэффициента отвечает $Fr_1 = Fr_1^{(KP)} \approx 0,50 - 0,55$ [1, 8], и именно в этом диапазоне величины $\left(\frac{L_1}{B_1}\right)_0$ и l_{10} максимальны. Как при $Fr_1 < Fr_1^{(KP)}$, так и при $Fr_1 > Fr_1^{(KP)}$ указанные величины снижаются, что связано с уменьшением коэффициентов остаточного сопротивления.

3. Влияние типа движителя на величины $\left(\frac{L_1}{B_1}\right)_0$ и l_{10} оказалось различным. Переход от гребного винта к водомету ведет к заметному уменьшению величины $\left(\frac{L_1}{B_1}\right)_0$. Это объясняется тем, что для увеличения КПД водомета целесообразно, в отличие от гребного винта, увеличивать ширину центрального корпуса, что при прочих равных условиях и ведет к снижению относительного удлинения. Это видно из рис 1. При использовании схемы WARP зависимость вида $\left(\frac{L_1}{B_1}\right)_0 = f_*(\lambda), 0 \leq \lambda \leq 1$ можно искать путем линейной интерполяции между графиками рис. 1, когда рис. 1, а отвечает $\lambda = 1$ и соответственно рис. 1, б — $\lambda = 0$.

Наоборот, оптимальные значения относительной длины по результатам выполненного расчетов оказались мало чувствительными к типу движителя (поэтому на рис. 2 и приведен один общий график). Этот результат также закономерен, поскольку тип движителя не влияет на оптимальную длину центрального корпуса судна с ауриггерами, а от ширины или осадки центрального корпуса относительная длина непосредственно не зависит.

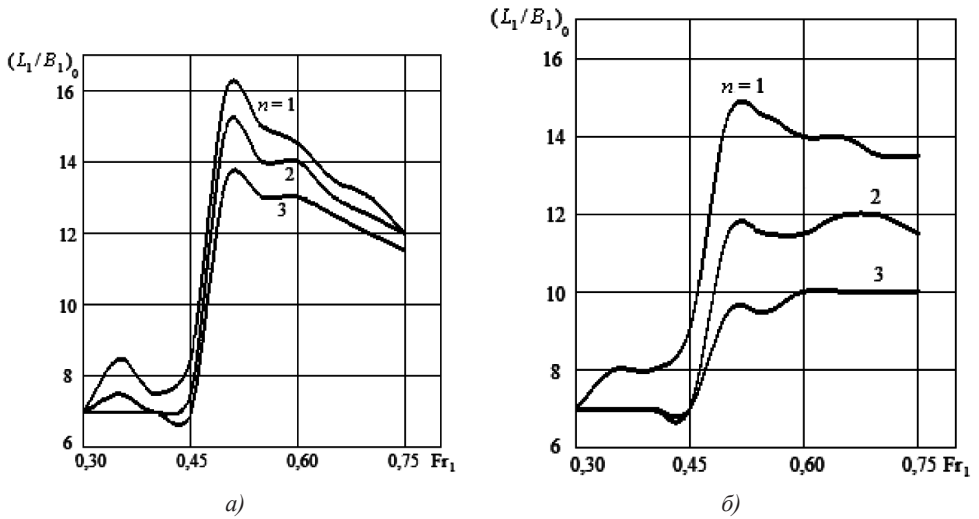


Рис. 1. Зависимость оптимальных значений относительного удлинения центрального корпуса $(L_1/B_1)_0$ от числа Фруда Fr_1 и параметра n по экспериментальным данным [1] при использовании в качестве движителей гребных винтов (а) и водометов (б)

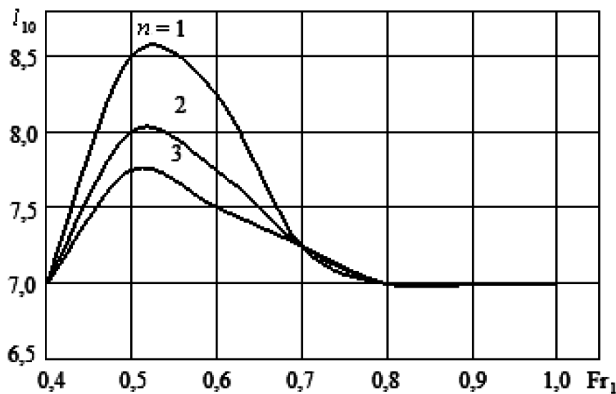


Рис. 2. Зависимость оптимальных значений относительной длины центрального корпуса l_{10} от числа Фруда Fr_1 и параметра n по экспериментальным данным [8] (гребные винты и водометы)

4. Оптимальное по ходкости отношение ширины центрального корпуса к его осадке по очевидным причинам не зависит от параметра n , а его зависимость от типа движителя оказалась, по результатам расчетов, не выходящей за пределы $\pm(0,10 - 0,25)$.

5. Функциональная зависимость вида $(B_1/T_1)_0 = f_{**}(Fr_1)$ в высокоскоростном диапазоне при $Fr_1 = 0,4...1,0$ отличается от аналогичных зависимостей [7, 10] для среднескоростных катамаранов. Требо-

вания к размещению движителя, существенно влияющие на величину $(B_1/T_1)_0$ в среднескоростном диапазоне, в данном случае сказываются в меньшей степени (эта закономерность проявляется и через слабо выраженную зависимость $(B_1/T_1)_0$ от типа движителя). Определяющей оказывается зависимость $(B_1/T_1)_0$ от сопротивления, и по аналогии с работой авторов [10] можно записать:

$$\left(\frac{B_1}{T_1}\right)_0 = f_{***} \left[\left(\frac{B_1}{T_1}\right)_{\min R_R}, \left(\frac{B_1}{T_1}\right)_{\min R_F} \right],$$

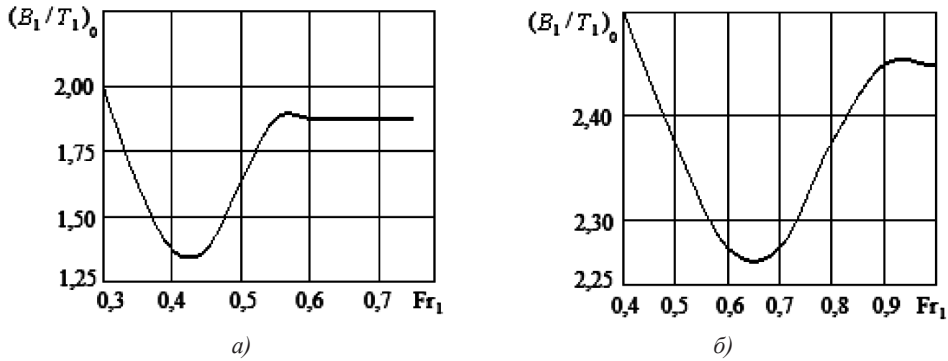


Рис. 3. Зависимость оптимальных значений отношения ширины центрального корпуса к осадке $(B_1/T_1)_0$ от числа Фруда Fr_1 по экспериментальным данным [1] (а) и [8] (б)

где величины $\left(\frac{B_1}{T_1}\right)_{\min R_R}$ и $\left(\frac{B_1}{T_1}\right)_{\min R_F}$ отвечают оптимальным значениям отношения ширины центрального корпуса к осадке по минимуму остаточного сопротивления и сопротивлению трения соответственно.

При этом справедливы приближенные соотношения [10] вида

$$\left(\frac{B_1}{T_1}\right)_{\min R_F} \approx \left(\frac{B_1}{T_1}\right)_{\min \Omega_1} \approx \frac{2}{\alpha_1} \approx \frac{1,7}{\delta_1},$$

где α_1 — коэффициент полноты площади КВЛ центрального корпуса, а величина $\left(\frac{B_1}{T_1}\right)_{\min \Omega_1}$ отвечает минимуму площади смоченной поверхности центрального корпуса.

В данном случае величина $\left(\frac{B_1}{T_1}\right)_{\min \Omega_1}$ имеет порядок 3, а величина $\left(\frac{B_1}{T_1}\right)_{\min R_F}$ существенно меньше. Тогда итоговое значение $(B_1/T_1)_0$ определяется, как и в случае характеристик удлинения, относительной долей коэффициента остаточного сопротивления в общем балансе коэффициента сопротивления воды движению судна. Эта доля максимальна при $Fr_1 = Fr_1^{(KP)}$ и снижается при $Fr_1 < Fr_1^{(KP)}$ и при $Fr_1 > Fr_1^{(KP)}$. Характер кривых $(B_1/T_1)_0 = f_{**}(Fr_1)$ на рис. 3 и обусловлен указанным обстоятельством.

Рассмотрим теперь возможные приближенные подходы к учету требований к мореходности на встречном волнении. После решения задач (9), (10) находим экономически оптимальные комбинации $\left(\frac{L_1}{B_1}\right)_0 - \left(\frac{B_1}{T_1}\right)_0$ и $l_{10} - \left(\frac{B_1}{T_1}\right)_0$ соответственно. Этим комбинациям при заданных водоизмещении и коэффициенте общей полноты центрального корпуса отвечают найденные по формулам (3) и (6) соответственно абсолютные значения длины центрального корпуса $L_1 = L_{10}$. Далее целесообразно проверить условие

$$L_{10} \geq L_{\min}$$

где L_{\min} — такая длина центрального корпуса судна с аутриггерами, при которой при $L_1 < L_{\min}$ имеет место резкое ухудшение характеристик мореходности на встречном волнении.

Величина L_{\min} определяется в первом приближении на основе диаграмм [4] для центрального корпуса судна с аутриггерами как для однокорпусного судна. Пусть по изложенной выше схеме получилось $L_{10} < L_{\min}$. Тогда, имея на основе соотношений (3) и (9) или (6) и (10) такие зависимости типа $F_1 = F_1(L_1)$ и $F_2 = F_2(L_2)$, что $L_{10} = \arg \min_{L_1} F_1(L_1)$ или $L_{10} = \arg \min_{L_1} F_2(L_1)$, сможем найти величины $\Delta F_1 = F_1(L_{\min}) - F_1(L_{10})$ и $\Delta F_2 = F_2(L_{\min}) - F_2(L_{10})$.

В этом случае величины

$$\Delta S_1 = s_K V_1^{2/3} \Delta F_1 \left(C_{KM} q_M + C_{KT} q_T \frac{L_R}{v} \right)$$

или

$$\Delta S_2 = s_K V_1^{2/3} \Delta F_2 \left(C_{KM} q_M + C_{KT} q_T \frac{L_R}{v} \right),$$

где s_K — стоимость единицы массы корпуса, будут характеризовать увеличение строительной стоимости из-за того, что принято $L_1 = L_{min} > L_{10}$.

Последующие расчетные оценки, результат которых существенно зависит от класса проектируемого судна и модели его использования, должны дать ответ на вопрос, оправдывает ли такое увеличение улучшение условий эксплуатации судна. На практике ответ часто бывает положительным [17].

Все сказанное относилось к центральному корпусу. В общем случае таким же путем, задавшись объемным водоизмещением аутриггера $V_2 \approx (0,03 \dots 0,07)V$ и приняв коэффициент общей полноты аутриггера $\delta_2 \approx 0,5$, можно найти для него оптимальные комбинации $(L_2/B_2)_0 - (B_2/T_2)_0$ или $l_{20} - (B_2/T_2)_0$ как функции числа Фруда по водоизмещению или по длине, а затем и оптимальные абсолютные значения главных размерений L_{20}, B_{20}, T_{20} по соотношениям, которые аналогичны формулам (1)–(6). Здесь L_2, B_2, T_2 — длина, ширина и осадка аутриггера, а его относительная длина $l_2 = L_2 / \sqrt[3]{V_2}$.

Если движительный комплекс расположен в центральном корпусе, то в соотношениях, аналогичных (7)–(10), принимается $\eta_{пр} = \eta_{пр} \left(\frac{L_2}{B_2}, \frac{B_2}{T_2} \right) \equiv 1$, соответственно в противном случае зависимость $\eta_{пр} \left(\frac{L_2}{B_2}, \frac{B_2}{T_2} \right)$ оценивается, как и ранее. Кроме того, здесь будут иметь место следующие особенности:

1. Аутриггер практически никогда не засчитывается в общую продольную

прочность судна, и это следует учитывать по изложенной выше схеме.

2. Число Фруда по длине аутриггера $Fr_2 = \frac{v}{\sqrt{gL_2}} = Fr_1 \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} > Fr_1$ и может выйти из области применения использованных выше для центрального корпуса систематических серий [1, 8]. При достаточно высокой скорости аутриггер может оказаться движущимся в режиме глиссирования. Но, в отличие от одиночного глиссера, он лишен возможности свободного изменения ходовой посадки. Это может вести к заметному росту его сопротивления — не говоря уже о том, что на всех построенных и проектируемых судах с аутриггерами, несмотря на их высокие скорости, аутриггеры имеют весьма небольшую ширину. А это совсем не характерные для глиссеров обводы. Поэтому в соответствии с рекомендациями [5] длину аутриггера следует ограничить снизу условием недопущения глиссирования. Это условие можно записать как $Fr_2 < 1$ или как $L_2 > \frac{v^2}{g}$.

3. Мореходность судна с аутриггерами на встречном волнении определяется длиной центрального корпуса, и нет необходимости вводить аналогичное ограничение на длину аутриггера.

4. Можно считать, что актуальность для аутриггеров изложенной выше для центрального корпуса схемы ограничивается лишь теми ситуациями, когда в аутриггерах расположен движительный комплекс. Во всех прочих случаях следует ввести ограничение на длину вида $L_2 > \frac{v^2}{g}$, а значения прочих главных размерений аутриггера определяются размещаемым в нем оборудованием.

ВЫВОДЫ

1. Полученные в результате выполненного расчетного исследования

диаграммы определяют относительное удлинение (относительную длину) и отношение ширины к осадке центрального корпуса, которые отвечают экстремумам частных целевых функций.

2. Зависимость этих величин от относительной скорости, а также от коэффициента, определяющего степень влияния общей продольной прочности на массу корпуса, физически обоснованы.

3. Заметное влияние типа движителя (гребной винт и водомет) испытывает

только относительное удлинение центрального корпуса.

4. Отношение ширины центрального корпуса к осадке определяется в основном соотношением между долями остаточного сопротивления и сопротивления трения в общем балансе сопротивления воды движению судна. Влияние типа движителя (через условия размещения) получается по результатам расчётов менее существенным, чем для среднескоростных катамаранов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Алферьев, М. Я.** Транспортные катамараны внутреннего плавания [Текст] / М. Я. Алферьев, Г. С. Мадорский. — М. : Транспорт, 1976. — 336 с.
- [2] **Ашик, В. В.** Проектирование судов [Текст] / В. В. Ашик. — Л. : Судостроение, 1985. — 320 с.
- [3] **Балкашин, А. И.** Проектирование кораблей [Текст] / А. И. Балкашин. — М. : Воениздат, 1954. — 390 с.
- [4] **Бородай, И. К.** Мореходность судов [Текст] / И. К. Бородай, Ю. А. Нецветаев. — Л. : Судостроение, 1982. — 288 с.
- [5] **Дубровский, В. А.** Сравнение судов с аутриггерами с другими многокорпусными судами [Текст] / В. А. Дубровский // Судостроение. — 2001. — № 1. — С. 9–14.
- [6] **Ефименко, А. А.** Определение относительной длины малого двухкорпусного судна [Текст] / А. А. Ефименко // Автоматизированное проектирование и конструкции судов: сб. науч. трудов. — Николаев : НКИ, 1988. — С. 40–45.
- [7] **Кириченко, С. А.** Исследование влияния отношения ширины корпуса катамарана к осадке на его сопротивление и мощность [Текст] / С. А. Кириченко // Труды ЦНИИ морского флота. — Л. : Транспорт, 1979. — Вып. 243. — С. 132–138.
- [8] **Сахновский, Б. М.** Прогнозирование мощности главных двигателей при проектном обосновании характеристик скоростных судов [Текст] / Б. М. Сахновский // Судостроение. — 2006. — № 5. — С. 23–28.
- [9] **Соломенцев, О. И.** Учет общей продольной прочности при оптимизации элементов одно- и двухкорпусных многопалубных судов [Текст] / О. И. Соломенцев // Судостроение: республ. межвед. науч.-техн. сборник. — К. ; О. : Вища школа, 1981. — Вып. 30. — С. 18–22.
- [10] **Соломенцев, О. И.** Определение основных элементов двухкорпусного судна в начальном приближении [Текст] / О. И. Соломенцев // Особенности проектирования судов перспективных архитектурно-конструктивных типов. — Николаев : Черноморское межобластное правление НТО им. акад. А. Н. Крылова, 1989. — С. 3–33.

- [11] **Соломенцев, О. И.** Определение главных элементов корабля с аутриггерами в начальном приближении [Текст] / О. И. Соломенцев, Буй Ши Тао // 36. наук. праць УДМТУ. — Миколаїв : УДМТУ, 2001. — № 4 (376). — С. 51–57.
- [12] Справочник по теории корабля [Текст] / под ред. Я. И. Войткунского. — Т. 3 : Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. — Л. : Судостроение, 1985. — 544 с.
- [13] **Davidson, G.** New Standards for Catamaran Sea-keeping [Text] / G. Davidson, T. Roberts // Naval Architect. — 2007. — September.
- [14] Design and Hydrodynamic Performance of a Frigate Class Trimaran [Text] / Kuk-Jin Kang, Chun-Ju Lee, Sun-Young Kim [a. o.] / Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering. — Ulsan University, 2005. — 9 p.
- [15] **Eames, M. C.** Concept Exploration: an Approach to Small Warships Design [Text] / M. C. Eames, T. G. Drummond // Naval Architect. — 1977. — № 2. — P. 29–46.
- [16] **Migalli, A.** Experimental Study of the Efficiency of Trimaran Configuration for High Speed Very Large Ships [Text] / A. Migalli, S. Miranda, S. Pensa // Conference FAST. — 2001. — Southampton : RINA, 2001. — 5 p.
- [17] SAS «Amatola». Lead Ship of the «Valour» Class for the South African Navy (SAN) [Text] // Naval Forces. — 2005. — Vol. 26, № 3. — P. 138–142.
- [18] **Scott, R.** Big is Beautiful for RNLN's New Patrol Ship Sentinels [Text] / R. Scott // Jane's Navy International. — 2008. — Vol. 113, June. — P. 16–24.