

DOI 10.15589/jnn20150403
УДК 629.5.022.3
С60

SELECTION AND SUBSTANTIATION OF THE RELATIVE POSITION
OF THE CENTRAL HULL AND OUTRIGGERS FOR THE TRIMARAN SHIP
ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ
ЦЕНТРАЛЬНОГО КОРПУСА И АУТРИГГЕРОВ ДЛЯ СУДНА-ТРИМАРАНА

Oleh I. Solomentsev
solomen@mksat.net
ORCID: 0000-0002-5106-6486

Nhuen Tkhen Nam
Nguyenthiennam2210@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9255-7978

О. И. Соломенцев
д-р техн. наук, проф. НУК

Нгуен Тьен Нам
магистрант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The relative position of the central hull and the outriggers of the ship with outriggers has been considered in this article. The volume of the outrigger as a part of the central hull volume, stagger and horizontal clearance are determined. The simplified optimization methods are used and the minimization of the wave resistance of the outrigger ship is taken as a criterion. In general, for determining the stagger and horizontal clearance, the stability of a damaged and non-damaged ship, buoyancy of a damaged ship, volumes, roll in beam waves and effects, connected with roll, course stability and also heave and pitch in head waves are taken into account. In this article, only the wave resistance, stability of a non-damaged ship and green water and slamming, connected with the roll in beam waves are numerically considered. Other factors are to be numerically analyzed later. According to the theoretical determination of the wave resistance and some another factors, the bow, middle and stern positions of the outriggers are compared. It is showed, that the bow and stern positions of outriggers are approximately equal to wave resistance. But, considering some other factors, the bow position of the outriggers is best. Then, it is also shown that according to the wave resistance, the volume of the outrigger as a part of the central hull volume is not connected with the stagger. It is shown that the influence of the horizontal clearance on the wave resistance is small. So, the horizontal clearance is determined as a function of the stability of non-damaged ship, necessary volumes and effects, connected with roll in beam waves. The frequencies of slamming and green water, connected with the roll are also considered.

Key words: a ship with outriggers; central hull; outrigger; wave resistance; stability.

Аннотация. Рассмотрено определение наиболее целесообразного взаимного расположения центрального корпуса и аутриггеров судна соответствующего типа на основе приближённой вариантной оптимизации. Учтены требования в части волнового сопротивления воды движению судна, остойчивости, вместимости и характеристик бортовой качки.

Ключевые слова: судно с аутриггерами; центральный корпус; аутриггер; волновое сопротивление; остойчивость.

Анотація. Розглянуто визначення найдоцільнішого взаємного розташування центрального корпусу й аутриггерів судна відповідного типу на підставі наближеної варіантної оптимізації. Узято до уваги вимоги в частині хвильового опору рухові судна, остійності, місткості й характеристик бортової хитаєвості.

Ключові слова: судно з аутриггерами; центральний корпус; аутриггер; хвильовий опір; остійність.

REFERENCES

- [1] Artyushkov L. S., Lyakhovitskiy A. G., Yurkov N. N. *Ekspерimentalnoe issledovanie soprotivleniya vody dvizheniyu trekhkorpusnykh sudov* [Experimental study of water resistance to the movement of three hull vessels]. *Sudostroenie — Shipbuilding*, 1975, no. 12, pp. 7–10.
- [2] Batuev A. D. *Raschet zashchishchennogo nadvodnogo borta sudov FRP* [Calculation of the protected free board of FRP vessels]. *Trudy KTIRPiKh — Proceedings of Kaliningrad Technical Institute of Fishery Industry*, 1982, issue 99, pp. 23–30.
- [3] Dubrovskiy V. A. *Osobennosti volnovogo soprotivleniya mnogokorpusnykh sudov* [Specific features of the wave resistance of multihull vessels]. *Sbornik NTO im. akad. A.N. Krylova — Collected Book of Academician Krylov Technical Society*, 1977, issue 249, pp. 32–38.

- [4] Dubrovskiy V. A. *Mnogokorpusnye suda: Metodicheskie problemy proektirovaniya mnogokorpusnykh obektov i sravneniya ikh morekhodnykh kachestv* [Multihull vessels: Methodological issues of the design of multihull objects and comparison of their seaworthiness]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978, pp. 182–191.
- [5] Dubrovskiy V. A. *Sravnenie sudov s auttriggerami s drugimi mnogokorpusnymi sudami* [Comparison of outrigger ships with other multihull vessels]. *Sudostroenie — Shipbuilding*, 2001, no. 1, pp. 9–14.
- [6] Moroz V. V. *Eksperimentalnoe issledovanie soprotivleniya vody dvizheniyu trekhkorpusnykh sudov* [Experimental study of water resistance to the movement of three hull vessels]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUS*, 2004, no. 2, pp. 11–16.
- [7] Pozdieiev V. O., Bondarenko O. V., Boiko A. P. *Rozrakhunok oporu bahatokorpusnykh suden na etapi kontseptualnoho proektuvannia* [Calculation of the resistance of multihull vessels at the stage of conceptual design]. *Visnyk NUK — NUS Journal*. Electronic Edition, 2011, no. 3. Available at: <http://evn.nuos.edu.ua/issue/view/1348>.
- [8] Solomentsev O. I., Bui Shi Tao. *Opreddenie glavnykh elementov korablya s auttriggerami v nachalnom priblizhenii* [Determination of the main elements of the ship with outriggers in the initial approximation]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUS*. 2001, no. 4, issue 376, pp. 51–57.
- [9] Solomentsev O. I., Telyaga L. S. *O primenenii chastnykh tselevykh funktsiy pri issledovanii kontseptsii sudov s auttriggerami* [On the application of specific objective functions in the study of the concept of vessels with outriggers]. *Visnyk NUK — NUS Journal*. Electronic Edition, 2011, no. 2. Available at: <http://evn.nuos.edu.ua/issue/view/1339>.
- [10] Solomentsev O. I., Telyaga L. S. *Zalivaemost i sleming sudna s auttriggerami v polozenii lagom k volnam* [Wave sweeping and slamming of a vessel with outriggers in a lag position to waves]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK — Collection of Scientific Publications of NUS*. 2012, no. 1, pp. 3–14.
- [11] Solomentsev O. I., Fam Kuang Shon. *Zhivuchest fregata s auttriggerami pod deystviem udarnoy nagruzki* [Survivability of a frigate with outriggers under the influence of impact loading]. *Visnyk NUK — NUS Journal*. Electronic Edition, 2013, no. 4. Available at: <http://evn.nuos.edu.ua/issue/view/1650>.
- [12] Andrews D., Zhang J. W. A Novel Design Situation to Stability the Trimaran Ship. International Conference of Watertight Integrity & Ship Survivability, London, 1995. 10 p.
- [13] Biancardi C. G., Kutcher J., Datla R. Test Series Results of Varying Yaw and Roll Angles of Trimaran Amas. *Journal of Shipping and Ocean Engineering*, 2014, no. 4, pp. 57–62.
- [14] Carr B., Dvorak R. Investigation of Trimaran Interference Effects. N.Y., Webb Institute, 2007. 176 p.
- [15] Kang K. J., Lee C. J., Kim S. Y. Design and Hydrodynamic Performance of a Frigate Class Trimaran, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Ulsan University, 2005. 9 p.
- [16] Katayama T., Taniguchi T., Fuji H. Development of the Maneuvering Simulation Method for the High Speed Craft Using Hydrodynamic Forces. Obtained from Model Tests, 10th International Conference of Fast Sea Transportation, Athens, 2009. 13 p.
- [17] Elcin Z. Wave Making Resistance Characteristics of Trimaran Hulls. Master of Science Thesis., Naval Postgraduate School. Monterey, 2003. 92 p.
- [18] Mizine I., Karafiath G., Queutey P. Interference Phenomenon Design of Trimaran Ship, 10th Conference of Fast Sea Transportation (FAST-2009), Athens, 2009. 18 p.
- [19] Mizine I., Amromin E., Crook L. High Speed Trimaran Drag: Numerical Analysis and Model Tests, *Journal of Ship Research*, 2004, no. 3. 13 p.
- [20] Javanmardi M. R., Jahanbakhsh E., Seif M. S. Hydrodynamic Analysis of Trimaran Vessels, *Polish Maritime Research*, 2008, vol. 15, no. 1, issue 55, pp. 11–18.
- [21] Kurultay A. A. Sensivity Analysis of the Seakeeping Behaviour of Trimaran Ship, Master of Science Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, 2003. 87 p.
- [22] Migalli A., Miranda S., Pensa S. Experimental Study of the Efficiency of Trimaran Configuration for High Speed Very Large, Conference FAST, 2001. Southampton, RINA, 2001. 9 p.
- [23] Min-Chung Fang, Zen-Hwa Chang, Shih-An Yang. The Effect of Side Hull Arrangement on the Maneuvering Characteristics of the Trimaran, Proceedings of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing, 2010. 10 p.
- [24] Mizine I. S. Harries W. Brenner. Hull Form Development for a High-Speed Trimaran Trailership, 9th Symposium of High Speed Marine Vehicles. Naples, 2011. 8 p.
- [25] Mynard T., Sahoo P. K., Mikkelsen J. Numerical and Experimental Study of Wave Resistance for Trimaran Hull Forms, Proceedings of the 6th International Conference of High-Performance Marine Vehicles. Naples, 2008. 16 p.

- [26] Suzuki K., Ikehata M. Fundamental Study on Optimum Position of Outriggers of Trimaran from View Point of Wave Making Resistance, Proceedings of the 2nd International Conference of Fast Sea Transportation (FAST-93), Yokohama, 1993.
- [27] Verna S., Khan K., Praveen P. C. Trimaran Hull Form Optimization, Using Shipflow, International Journal of Innovative Research and Development, 2012, no. 10. 11 p.
- [28] Zhang J. W., W. J. van Griethuysen. Trimaran Design, Naval Platform Technology Seminar, 2000.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При проектировании судов и надводных кораблей с аутриггерами важной представляется схема поиска начального приближения, предшествующего процессу оптимизации главных элементов такого судна. В этом случае одним из известных в классической теории проектирования судов методов определяются приближённо оптимальные главные элементы проектируемого судна с аутриггерами, которые затем уточняются на основе решения оптимизационной задачи.

Для корабля с аутриггерами задача поиска начального приближения распадается на две:

1. Определение приближённо оптимальных главных размерений и коэффициентов полноты для центрального корпуса и аутриггеров.
2. Нахождение приближённо оптимального взаимного расположения центрального корпуса и аутриггеров.

Самое приближённое решение первой задачи, основанное на обработке статистических данных, приведено в работе [8]. Более точное решение, основанное на применении метода частных целевых функций, реализовано в работе [9]. В то же время авторам неизвестны такие решения второй задачи, которые по уровню сложности отвечали бы начальной стадии проектирования, предшествующей созданию математической модели.

В работе [24] задача по выбору оптимального взаимного расположения центрального корпуса и аутриггеров содержит семь переменных и решается в многокритериальной постановке. Из числа этих переменных три связаны с формой центрального корпуса, две — с формой бульба и только оставшиеся две — с взаимным расположением центрального корпуса и аутриггеров. Решаемая в [24] задача фактически связана с разработкой математической модели судна с аутриггерами и предусматривает применение генетического алгоритма. В связи с этим принятие в многокритериальной задаче [24] совокупности технических критериев оптимизации, не связанных с экономическими показателями рассмотренного в указанной работе судна с аутриггерами с горизонтальной погрузкой, вряд ли может считаться обоснованным. В других исследованиях по этому поводу имеются лишь отдельные, недостаточно увязанные между собой рекомендации. Так, в [14] указано, что в диапазоне чисел

Фруда по длине центрального корпуса от 0,25 до 0,35 существенное влияние на ходкость судна с аутриггерами оказывает сопротивление центрального корпуса, рассматриваемого как изолированный, а при больших числах Фруда значительным становится влияние на сопротивление взаимодействия корпусов. Поэтому определение приближённо оптимального взаимного расположения центрального корпуса и аутриггеров корабля соответствующего типа на стадии, предшествующей решению оптимизационной задачи, и является рассматриваемой в данной статье проблемой.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ влияния взаимного расположения центрального корпуса и аутриггеров на различные свойства корабля-тримарана рассмотрен в достаточно большом количестве исследований. Первые такие исследования относятся к 1970-м гг., в которых изучаются тримараны с равными или близкими по величине корпусами [1, 3]. Позднее, примерно с начала 1990-х гг. и до настоящего времени такие исследования выполняются уже применительно к кораблям с аутриггерами. В первую очередь уделяется внимание влиянию взаимного расположения корпусов на интерференционные эффекты и на волновое сопротивление, этому вопросу посвящено наибольшее количество работ [1, 3, 6, 7, 13–16, 18–20, 22–27]. Дополнительно в [13] рассмотрено влияние начального конструктивно приданного аутриггеру угла крена и угла рыскания на сопротивление. В то же время имеются и исследования, посвящённые исследованиям влияния взаимного расположения корпусов и на другие характеристики корабля с аутриггерами: вязкостное сопротивление [17], начальная остойчивость [12], управляемость и посадка [16, 17, 20, 23], остойчивость и взрывостойкость [11], мореходность [10, 16, 21]. Задача, в общем близкая к рассмотренной в данной работе, поставлена и решена в [24]. Однако, как упоминалось ранее, по степени сложности это решение отвечает последующей стадии проектирования.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработка расчётной схемы для определения приближённо оптимального взаимного расположения центрального корпуса и аутриггеров корабля-тримарана для стадии проектирования, предшествующей разработке математической модели.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В основе данного исследования лежит решение частной однокритериальной оптимизационной задачи. При ее решении предполагается, что водоизмещение судна с аутриггерами постоянно, а характеристики формы центрального корпуса и аутриггеров найдены на основе метода частных целевых функций [9]. Поэтому данная задача представляет собой, по существу, иную модификацию того же метода частных целевых функций, ее постановка имеет вид:

$$\bar{X}_0 = \arg \min_{\bar{X} \in \bar{X}_0} F(\bar{X}, \bar{H}); \quad (1)$$

$$\bar{X}_0 \subset \bar{X}: \bar{G}(\bar{X}, \bar{H}) - [G(\bar{X}, \bar{H})] \geq 0; \quad (2)$$

$$F(\bar{X}, \bar{H}) = R_{\text{пр}}(\bar{X}, \bar{H}); \{\bar{X}\} = x_1, x_2, x_3 = \bar{A}_{L1}, C_T, \frac{V_2}{V_1};$$

$$\{\bar{G}\} = g_i, \forall i \in 1, I; \{\bar{G}\} = [g_i], \forall i \in 1, I;$$

$$\{\bar{H}\} = v, D, L_1, \frac{L_1}{B_1}, \frac{B_1}{T_1}, z_g, [h], \delta_1, \alpha_1, \delta_2, \alpha_2;$$

$$C_T = \frac{C_{\Pi}}{L_1}, \bar{A}_L = \frac{A_L}{L_1},$$

где $\bar{H}$ — вектор исходных данных в решаемой задаче; $\bar{X}$ — вектор независимых переменных в данной задаче; $\bar{X}_0 \subset \bar{X}$ — вектор допустимых (отвечающих системе ограничений (2)) значений $\bar{X}$; $F(\bar{X}, \bar{H})$ — критерий оптимизации; v, L — скорость хода судна и длина центрального корпуса; V_1, V_2 — объёмные водоизмещения центрального корпуса и аутриггера; $D = \rho g(V_1 + 2V_2)$ — весовое водоизмещение судна с аутриггерами; A_{L1} — носовой выдвиг корабля с аутриггерами, рис. 1; L_1 — длина центрального корпуса, рис. 1; ρ, g — плотность воды и ускорение свободного падения; $\bar{G} = G(\bar{X}), g_i(\bar{X})$ — вектор ограничений как функций $\bar{X}$ и i -я компонента этого вектора как функции $\bar{X}$; $[G], [g_i]$ — вектор нормативов и i -я компонента этого вектора; I — количество компонент векторов $\bar{G}$ и $[G]$; B_1, T_1 — ширина и осадка центрального корпуса; C_{Π} — расстояние между ДП центрального корпуса и аутриггера; δ_1, δ_2 — коэффициенты общей полноты центрального корпуса и аутриггера; α_1, α_2 — коэффициенты полноты КВЛ центрального корпуса и аутриггера; z_g — аппликата центра тяжести судна с аутриггерами; $[h]$ — нормативное значение начальной поперечной метацентрической высоты для судна с аутриггерами.

Кроме того, высота надводного борта центрального корпуса и вертикальный клиренс предполагаются пропорциональными $\sqrt[3]{V_1}$. Предусматривается также, что длина аутриггера L_2 (рис. 1) и его объёмное водоизмещение V_2 связаны статистической зависимостью [8] как:

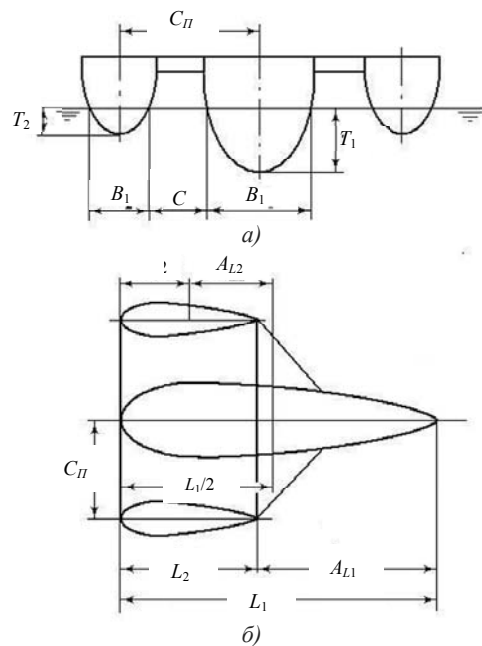


Рис. 1. Главные размеры корабля с аутриггерами:

a — вид спереди; b — вид сверху; уступ $S = 0$ и $A_{L1} + L_2 = L_1$

$$l_2 = \frac{L_2}{\sqrt[3]{V_2}} \approx -12,117Fr_2^2 + 17,013Fr_2 + 3,6455, \quad Fr_2 = \frac{v}{\sqrt{gL_2}}.$$

В качестве критерия оптимизации в частной оптимизационной задаче при определении характеристик центрального корпуса и аутриггеров принималась максимизация полезной нагрузки при заданных водоизмещении и скорости [9]. В данном же случае то или иное взаимное расположение аутриггеров и центрального корпуса практически не определяет массы корпуса, но существенно влияет на сопротивление воды движению судна и соответственно — на величину потребной мощности и на связанные с потребной мощностью массы механизмов и топлива. В первую очередь взаимное расположение корпусов сказывается на волновой составляющей сопротивления, что связано с интерференцией систем корабельных волн, образовавшихся при движении по свободной поверхности центрального корпуса и аутриггеров. Известное влияние взаимного расположения корпусов на вязкую составляющую сопротивления также имеет место [19], но оно менее существенно. Поэтому в роли критерия F в соотношении (1) принимается волновое сопротивление воды движению судна с аутриггерами $R_{\text{в}}(\bar{X}, \bar{H})$. Вместо безразмерного носового выдвиг $\bar{A}_{L1} = \frac{A_{L1}}{L_1}$ оптимизируемым параметром может быть взят и миделевой выдвиг $\bar{A}_{L2} = \frac{A_{L2}}{L_1}$, рис. 1. Из очевидных геометрических соображений следует, что соотношение между носовым A_{L1} и миделевым A_{L2}

выдвигами есть $A_{L2} = A_{L1} - (L_1 - L_2)/2$. Для тримарана с одинаковыми корпусами, когда $L_1 = L_2$, имеем $A_{L1} = A_{L2}$. Исследования по таким тримаранам выполнялись в 1970-х гг., но сейчас этот архитектурно-конструктивный тип не считается перспективным. Следует учитывать, что при теоретическом определении волнового сопротивления расчётным является миделевой выдвиг A_{L1} , а при непосредственном анализе интерференции поперечных ходовых волн от центрального корпуса и от аутриггера [1, 16] — носовой выдвиг A_{L1} . Наконец, в [13, 27] применён выдвиг $A_{L3} = A_{L1} + L_2/2$ — это расстояние между носовым перпендикуляром и миделем аутриггера.

Кроме того, в некоторых исследованиях рассматривается вместо выдвиги такая геометрическая характеристика взаимного расположения корпусов, как уступ (Stagger) S . Уступ представляет собой измеренное по горизонтали расстояние между кормовыми перпендикулярами центрального корпуса и аутриггеров. Очевидно, что $S = L_1 - L_2 - A_{L1}$ и $S = (L_1 - L_2)/2 - A_{L2}$. А в [27] этот же термин применён для выдвиги A_{L3} .

Таким образом, нашей задачей является нахождение оптимальных при постоянных в этой ситуации характеристиках центрального корпуса и аутриггеров для заданной скорости v значений трёх компонент — $x_1 = \bar{A}_{L1}$, $x_2 = C_T$ и $x_3 = V_2/V_1$ при постоянном водоизмещении D .

Рассмотрим первичное определение допустимой области в соотношении (2). Ещё в 1970-х гг. применительно к тримаранам с равными корпусами был

сделан предварительный вывод о том, что минимум волнового сопротивления отвечает ситуации, когда к форштевню бокового корпуса подходит подошва порождённой центральным корпусом ходовой волны. Это приводит к зависимости:

$$\bar{A}_{L1} = K_A \pi \times F_{r1}^2,$$

где K_A — эмпирический коэффициент, который для тримаранов с равными корпусами оказался близким к 0,8 [1].

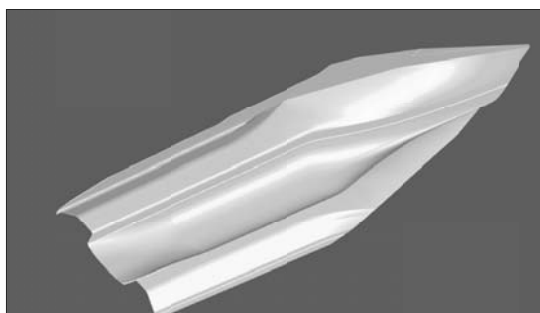
Экспериментальные данные по кораблям и судам с аутриггерами подтвердили это соотношение, причём оказалось, что в этом случае $K_A \approx 1$ [16]. Для уточнения этих результатов выполним ряд расчётов ходкости для судов с аутриггерами при систематическом изменении взаимного положения центрального корпуса и аутриггеров, т. е. величин C_T и $\bar{A}_{L1}$ в зависимости от числа Фруда $F_{r1} = v/\sqrt{gL_1}$ при постоянном отношении V_2/V_1 .

Расчёты производились на основе линейной теории волнового сопротивления с использованием алгоритма и программы, которые описаны в [7]. На рис. 3, а–б приведены графические зависимости для безразмерного волнового сопротивления судна с аутриггерами $r_w = R_w/D$ в функции числа Фруда $F_{r1} = v/\sqrt{gL_1}$. На этих рисунках индекс «Н» (носовое расположение) предусматривает расположение носовых перпендикуляров центрального корпуса и аутриггеров в одной плоскости $A_{L1} = 0$, а кормовое расположение (индекс «К») — ситуацию, когда транцы центрального корпуса и аутриггеров лежат в одной плоскости, $A_{L1} = L_1 - L_2$. При миделевом расположении (индекс «М») плоскости мидель-шпангоутов центрального корпуса и аутриггеров примерно совпадают, $A_{L1} \approx L_1/2$. При этом рис. 3, а отвечает значению $C_T = C_{T0} = [C_{\Pi}]/L_1$, рис. 3, б — значению $C_T = 1,2C_{T0}$. Здесь $[C_{\Pi}]$ — минимально допустимое расстояние между ДП аутриггера и центрального корпуса из условий начальной остойчивости, определяемое по приведенной ниже формуле (3).

Из этих рисунков следует, что параметр C_T оказывает незначительное влияние на волновое сопротивление. Миделевое расположение аутриггеров получается оптимальным по волновому сопротивлению при $Fr_1 > 0,55–0,60$. При этом большие значения Fr_1 отвечают меньшим значениям C_T . При $Fr_1 < 0,55–0,60$ с точки зрения минимизации волнового сопротивления более целесообразно располагать аутриггеры в оконечностях. При этом носовое и кормовое расположение аутриггеров с точки зрения волнового сопротивления практически равноценны. Сделанные выводы в основном совпадают с результатами работ [1, 3, 6, 7, 12–16, 18–20, 22–27].



а)



б)

Рис. 2. Проектное изображение патрульного корабля с аутриггерами австралийской фирмы Austal (а) и выполненная одним из авторов 3D модель поверхности патрульного корабля с аутриггерами (б)

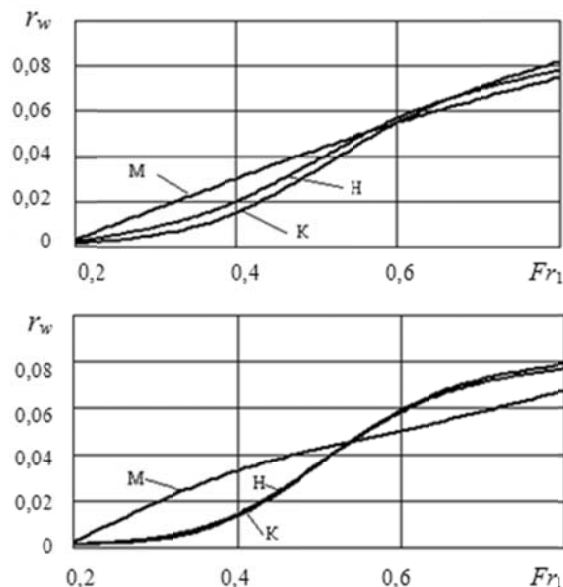


Рис. 3. Результаты систематических расчётов удельного волнового сопротивления судна с аутриггерами

Однако при выборе между носовым и кормовым расположением аутриггеров следует принимать во внимание следующие обстоятельства. Носовое расположение аутриггеров на практике не встречается ни в проектных проработках, ни, тем более, на построенных судах.

Дело в том, что при таком расположении аутриггеров, во-первых, существенно возрастает диаметр установившейся циркуляции [20] (в то же время наименьший диаметр циркуляции отвечает среднему расположению аутриггеров, а при сдвиге их в корму он несколько увеличивается [17, 22]). Во-вторых, возникает значительный ходовой дифферент на нос, что может привести как к существенному ходовому снижению остойчивости [20], так и к заметному вынужденному снижению скорости на встречных курсовых углах в свежую погоду из-за необходимости избежать интенсивного заливания. В связи с этим большинство построенных судов и надводных кораблей с аутриггерами имеет кормовое расположение аутриггеров, хотя иногда встречается и миделевое расположение.

С точки зрения качки на встречном волнении влияние положения аутриггеров не слишком существенно. Всё же при положении аутриггеров в оконечностях продольная качка оказывается несколько интенсивней [21].

Теперь можно перейти к выбору и обоснованию компонент векторов $\bar{G}$ и $[\bar{G}]$, учитывая при выборе оптимального вектора $\bar{X}_0$ наряду с соотношением (1) также и (2). Как было только что отмечено, должно быть исключено носовое расположение аутриггера ($\bar{A}_{L1} \geq 0,5$), так что

$$g_1(\bar{X}, \bar{H}) = x_1 = \bar{A}_{L1}, [g_1] = 0,5.$$

Из условия начальной остойчивости должно быть выполнено неравенство $C_{\Pi} \geq [C_{\Pi}]$ [8], таким образом

$$g_2(\bar{X}, \bar{H}) = x_2 L_1 = C_{\Pi}, [g_2] = [C_{\Pi}];$$

$$[C_{\Pi}] = \sqrt{\frac{\Delta I_x}{2S_2}}; \quad (3)$$

$$S_2 = \alpha_2 L_2 B_2; \quad \Delta I_x \cong \frac{\alpha_1^2 L_1 B_1^3}{12} + \frac{\alpha_2^2 L_2 B_2^3}{6} + V_1 T_1 \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \delta_1} + + 2V_2 T_2 \frac{\alpha_2}{\alpha_2 + \delta_2} - (V_1 + 2V_2)(z_g + [h]),$$

где ΔI_x — недостающий для обеспечения начальной остойчивости поперечный момент инерции площади ватерлинии [8].

Входящее в эти соотношения нормативное значение начальной поперечной метацентрической высоты для неповреждённого корабля с аутриггерами $[h]$ может быть принято по рекомендациям [12]. В соответствии с указанной работой, начальная поперечная метацентрическая высота корабля с аутриггерами должна быть не менее начальной поперечной метацентрической высоты неповреждённого однокорпусного корабля того же водоизмещения и назначения $[h_0]$ при условии, что один из аутриггеров корабля с аутриггерами полностью затоплен. При некоторых дополнительных допущениях приходим к простейшему соотношению вида $[h] \approx 1,7[h_0]$. Влияние аварийной остойчивости на выбор расстояния между корпусами, которое также достаточно существенно [28], будет рассмотрено авторами отдельно.

Кроме того, необходимо выполнить условия вместимости по площадям $S_{\Pi}(\bar{X}, \bar{H}) > [S_{\Pi}]$, где $S_{\Pi}(\bar{X}, \bar{H})$ — фактическая, а $[S_{\Pi}]$ — определяемая заданием на проектирование полезная площадь палуб, так что

$$g_3(\bar{X}, \bar{H}) = S(\bar{X}, \bar{H}), [g_3] = [S_{\Pi}].$$

При движении аутриггера следует избегать глисирования, т. е. $Fr_2 < 1$. Дело в том, что для аутриггера соединительный мост препятствует свободному изменению ходовой посадки, а это при $Fr_2 > 1$ ведёт к заметному ухудшению ходовых качеств судна [5]. Тогда $g_4 = v / \sqrt{gL_2}$ и $[g_4] = 1$.

Далее должны быть учтены требования в части слеминга и заливаемости при положении судна лагом к волнам (ограничения на коэффициенты безопасности [9]). Тогда

$$g_5(\bar{X}, \bar{H}) = \chi'_C(\bar{X}, \bar{H}), \quad g_6(\bar{X}, \bar{H}) = \chi''_C(\bar{X}, \bar{H}), \\ g_7(\bar{X}, \bar{H}) = \chi'_3(\bar{X}, \bar{H}), \quad g_8(\bar{X}, \bar{H}) = \chi''_3(\bar{X}, \bar{H}),$$

$$[g_5] = [\chi'_C]; [g_6] = [\chi''_C]; [g_7] = [\chi'_3]; [g_8] = [\chi''_3],$$

где $\chi'_C(\bar{X}, \bar{H})$, $\chi''_C(\bar{X}, \bar{H})$, $\chi'_3(\bar{X}, \bar{H})$, $\chi''_3(\bar{X}, \bar{H})$ — фактические коэффициенты безопасности по слемингу соединительного моста, днищевому слемингу аутриггера, заливанию и забрызгиванию аутриггера соответственно, все аналитические зависимости для этих коэффициентов как функций $\bar{X}$ и $\bar{H}$ содержатся в [10]; $[\chi'_C]$, $[\chi''_C]$, $[\chi'_3]$, $[\chi''_3]$ — нормативные коэффициенты безопасности.

Значения нормативных коэффициентов безопасности в первом приближении могут быть приняты по аналогии с двухкорпусными судами [4]. При этом для традиционных однокорпусных судов соответствующие нормативы на встречном и на боковом волнении получаются достаточно близкими [2].

Хотя коэффициент безопасности по слемингу соединительного моста и не имеет у традиционных кораблей прямых аналогий, всё же его значение с запасом может быть принято равным соответствующему нормативу по днищевому слемингу для традиционных кораблей [4]. При этом для слеминга нормативные коэффициенты безопасности получаются несколько выше, чем для заливания.

Наряду с фактическими и нормативными коэффициентами безопасности в расчёт могут браться также и фактические n_C , n_3 и нормативные $[n_C]$, $[n_3]$ частоты слеминга и заливания. Эти величины, измеряемые в час⁻¹, связаны с соответствующими коэффициентами безопасности как

$$n_C = 573\omega_\zeta \exp\left(-\frac{\chi_C^2}{2}\right); [n_C] = 573\omega_\zeta \exp\left(-\frac{[\chi_C]^2}{2}\right); \\ n_3 = 573\omega_\zeta \exp\left(-\frac{\chi_3^2}{2}\right); [n_3] = 573\omega_\zeta \exp\left(-\frac{[\chi_3]^2}{2}\right),$$

где ω_ζ есть измеряемая в сек⁻¹ средняя частота относительных перемещений при совместной бортовой и вертикальной качке в положении лагом к волнам, а штрихи опущены.

Обычно величина ω_ζ мало отличается от частоты собственных бортовых колебаний корабля. А нормативные частоты заливания $[n_3] = 40$ час⁻¹ и слеминга $[n_C] = 26$ час⁻¹ были получены по приведенным выше зависимостям на основе известных нормативов в части коэффициентов безопасности $[\chi_3]$ и $[\chi_C]$ [2, 4]. Поскольку $[\chi_3] < [\chi_C]$, то $[n_3] > [n_C]$.

Покажем далее некоторые практические результаты реализации описанной расчётной схемы. Обобщённые соотношения (1)–(3) оказалось возможным существенно упростить. Так, отношение V_2/V_1 харак-

теризует, в первую очередь, абсолютную величину максимумов и минимумов волнового сопротивления. Влияние этой величины на оптимальные по волновому сопротивлению выдвиги при различных скоростных режимах невелико, и этот результат согласуется с данными [3]. В задаче (1)–(2) величина V_2/V_1 более существенна при определении допустимой области по (2), чем при нахождении оптимального решения по (1).

Далее, как уже отмечалось выше (ср. рис. 1, а и 1, б), параметр СП слабо влияет на волновое сопротивление и определяется в основном условиями начальной остойчивости и заливания с борта (рис. 4). Дополнительно здесь должно проверяться и условие по вместимости, которое для рассмотренного в расчётном примере патрульного корабля с аутриггерами оказалось неактуальным, и его проверка на рис. 4 не показана.

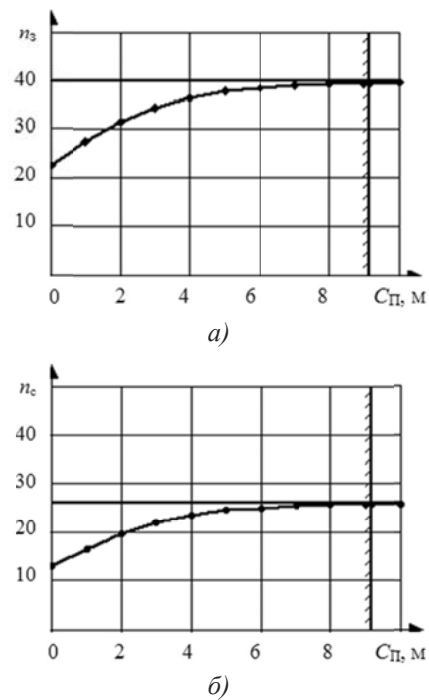


Рис. 4. К определению величины C_{II} из условий начальной остойчивости и заливания (а) и слеминга (б) в положении лагом и волнам:

— зависимость частот заливания n_3 (а) и слеминга n_C (б) от параметра C_{II} при высоте волны 3%-обеспеченности $h_{3\%} = 6$ м; — ограничение на минимальное значение параметра $C_{II} = [C_{II}]$ из условия начальной остойчивости; — нормативные частоты заливания и слеминга $[n_3] = 40$ час⁻¹, $[n_C] = 26$ час⁻¹

ВЫВОДЫ. 1. Разработана расчётная схема для определения приближённо оптимального взаимного расположения центрального корпуса и аутриггеров корабля-тримарана для стадии проектирования, предоставляющей разработку математической модели.

2. Предварительные расчётные оценки позволяют исключить носовое расположение аутригге-

ров и учесть это соответствующим ограничением в системе (2). Такое расположение, не давая никакого или почти никакого выигрыша по волновому сопротивлению, ведёт к значительному ухудшению иных качеств судна (снижается управляемость, появляется дифферент на нос).

3. Влияние соотношения между подводными объёмами аутиггера и центрального корпуса на оптимальные по волновому сопротивлению выдвиги оказалось по данным расчётов малосущественным, что согласуется с выводами [3].

4. В отличие от двухкорпусных кораблей, у которых волновое сопротивление существенно зависит от соотношения между расстоянием между ДП корпусов

и длиной, здесь аналогичный параметр (соотношение между расстоянием между ДП центрального корпуса и аутиггера и длиной центрального корпуса) слабо влияет на волновое сопротивление. Поэтому искать указанный параметр можно из условий вместимости, начальной остойчивости и характеристик бортовой и вертикальной качки на боковом волнении (слеминга и заливания).

5. Влияние аварийной остойчивости и продольной качки на выбор взаимного расположения центрального корпуса и аутиггеров в данной работе не изучалось. Эти важные вопросы будут рассмотрены авторами позднее.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Артюшков, Л. С.** Экспериментальное исследование сопротивления воды движению трёхкорпусных судов [Текст]/Л. С. Артюшков, А. Г. Ляховицкий, Н. Н. Юрков // Л. : Судостроение, 1975. — № 12. — С. 7–10.
- [2] **Батуев, А. Д.** Расчёт защищённого надводного борта судов ФРП [Текст]/А. Д. Батуев // Труды КТИРПиХ. — Калининград : КТИРПиХ, 1982. — Вып. 99. — С. 23–30.
- [3] **Дубровский, В. А.** Особенности волнового сопротивления многокорпусных судов [Текст]/В. А. Дубровский // Сборник НТО им. акад. А. Н. Крылова. — 1977. — Вып. 249. — С. 32–38.
- [4] **Дубровский, В. А.** Методические проблемы проектирования многокорпусных объектов и сравнения их мореходных качеств [Текст]/В. А. Дубровский // В книге «Многокорпусные суда». — Л. : Судостроение, 1978. — С. 182–191.
- [5] **Дубровский, В. А.** Сравнение судов с аутиггерами с другими многокорпусными судами [Текст]/В. А. Дубровский // Судостроение, 2001. — № 1. — С. 9–14.
- [6] **Мороз, В. В.** Экспериментальное исследование сопротивления воды движению трёхкорпусных судов [Текст] / В. В. Мороз // Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2004. — № 2. — С. 11–16.
- [7] **Поздеев, В. О.** Розрахунок опору багатокорпусних суден на етапі концептуального проектування [Електронний ресурс] / В. О. Поздеев, О. В. Бондаренко, А. П. Бойко // Вісник НУК. — 2011. — № 3. — Режим доступу : <http://evn.nuos.edu.ua/issue/view/1348>.
- [8] **Соломенцев, О. И.** Определение главных элементов корабля с аутиггерами в начальном приближении [Текст]/О. И. Соломенцев, Буй Ши Тао // Збірник наукових праць УДМТУ. — Миколаїв : УДМТУ, 2001. — № 4 (376). — С. 51–57.
- [9] **Соломенцев, О. И.** О применении частных целевых функций при исследовании концепции судов с аутиггерами [Электронный ресурс]/О. И. Соломенцев, Л. С. Теляга // Вісник НУК. — 2011. — № 2. — Режим доступу : <http://evn.nuos.edu.ua/issue/view/1339>.
- [10] **Соломенцев, О. И.** Заливаемость и слеминг судна с аутиггерами в положении лагом к волнам [Текст] / О. И. Соломенцев, Л. С. Теляга // Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2012. — № 1. — С. 3–14.
- [11] **Соломенцев, О. И.** Живучесть фрегата с аутиггерами под действием ударной нагрузки [Электронный ресурс] / О. И. Соломенцев, Фам Куанг Шон // Вісник НУК. — 2013. — № 4. — Режим доступу : <http://evn.nuos.edu.ua/issue/view/1650>.
- [12] **Andrews, D.** A Novel Design Situation to Stability — the Trimaran Ship [Text] / D. Andrews, J. W. Zhang // International Conference of Watertight Integrity & Ship Survivability. — London : RINA, 1995. — 10 p.
- [13] **Biancardi, C. G.** Test Series Results of Varying Yaw and Roll Angles of Trimaran Amas [Text]/C. G. Biancardi, J. Kutcher, R. Datla // Journal of Shipping and Ocean Engineering. — 2014. — № 4. — Pp. 57–62.
- [14] **Carr, B.** Investigation of Trimaran Interference Effects [Text]/B. Carr, R. Dvorak. — N.Y., 2007. — Webb Institute. — 176 p.
- [15] Design and Hydrodynamic Performance of a Frigate Class Trimaran [Text]/K. J. Kang, C. J. Lee, S. Y. Kim a. o. // Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering. — Ulsan University, 2005. — 9 p.
- [16] Development of the Maneuvering Simulation Method for the High Speed Craft Using Hydrodynamic Forces, Obtained from Model Tests [Text]/T. Katayama, T. Taniguchi, H. Fuji a. o. // 10th International Conference of Fast Sea Transportation. — Athens, 2009. — 13 p.
- [17] **Elcin, Z.** Wave Making Resistance Characteristics of Trimaran Hulls [Text]/Z. Elcin // Master of Science Thesis. — Naval Postgraduate School. — Monterey, 2003. — 92 p.
- [18] Interference Phenomenon Design of Trimaran Ship [Text]/I. Mizine, G. Karafiath, P. Queutey a.o. // 10th Conference of Fast Sea Transportation (FAST-2009). — Athens, 2009. — 18 p.

- [19] High Speed Trimaran Drag: Numerical Analysis and Model Tests [Text] / I. Mizine, E. Amromin, L. Crook a.o. // Journal of Ship Research. — 2004. — № 3. — 13 p.
- [20] Hydrodynamic Analysis of Trimaran Vessels [Text] / M. R. Javanmardi, E. Jahanbakhsh, M. S. Seif a.o. // Polish Maritime Research. — 2008. — Vol. 15. — № 1 (55). — P. 11–18.
- [21] **Kurultay, A. A.** Sensivity Analysis of the Seakeeping Behaviour of Trimaran Ship [Text] / A. A. Kurultay // Master of Science Thesis. — Naval Postgraduate School. — Monterey, 2003. — 87 p.
- [22] **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. — 9 p.
- [23] **Min-Chung Fang.** The Effect of Side Hull Arrangement on the Maneuvering Characteristics of the Trimaran Ship [Text] / Min-Chung Fang, Zen-Hwa Chang, Shih-An Yang // Proceedings of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference. — Beijing, 2010. — 10 p.
- [24] **Mizine, I.** Hull Form Development for a High-Speed Trimaran Trailership [Text] / I. Mizine, S. Harries, W. Brenner // 9th Symposium of High Speed Marine Vehicles. — Naples, 2011. — 8 p.
- [25] Numerical and Experimental Study of Wave Resistanse for Trimaran Hull Forms [Text] / T. Mynard, P.K. Sahoo, J. Mikkelsen a. o. // Proceedings of the 6th International Conference of High-Performance Marine Vehicles (HIPER'08). — Naples, 2008. — 16 p.
- [26] **Suzuki, K.** Fundamental Study on Optimum Position of Outriggers of Trimaran from View Point of Wave Making Resistance [Text] / K. Suzuki, M. Ikehata // Proceedings of the 2nd International Conference of Fast Sea Transportation (FAST-93). — Yokohama, 1993.
- [27] Trimaran Hull Form Optimization, Using Shipflow [Text] / S. Verna, K. Khan, P. C. Praveen a. o. // International Journal of Innovative Research and Development. — 2012. — № 10. — 11 p.
- [28] **Zhang, J. W.** Trimaran Design [Text] / J. W. Zhang, W. J. van Griethuysen // Naval Platform Technology Seminar, 2000.

© О. І. Соломенцев, Нгуен Тьен Нам

Надійшла до редколегії 09.07.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. Ю. М. Коробанов