

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ МНОГОКОРПУСНЫХ СУДОВ НА ЭТАПЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В. А. Поздеев, проф., д-р физ.-мат. наук¹;
А. В. Бондаренко, доц., канд. техн. наук²;
А. П. Бойко, доц., канд. техн. наук²

¹*Николаевский национальный университет им. В.А. Сухолинского, г. Николаев*

²*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

Аннотация. Рассмотрен вопрос определения буксировочного сопротивления и мощности многокорпусных судов. Приведены результаты тестирования предложенного алгоритма на примере судов типа «Slice».

Ключевые слова: многокорпусное судно, буксировочное сопротивление, волновое сопротивление, достоверность, алгоритм.

Анотація. Розглянуто питання визначення буксирувального опору та потужності багатокорпусних суден. Наведено результати тестування запропонованого алгоритму на прикладі суден типу «Slice».

Ключові слова: багатокорпусне судно, буксирувальний опір, хвильовий опір, достовірність, алгоритм.

Abstract. The problem of estimation of multihull ships total resistance and power is considered. The results of testing of the introduced algorithm are shown on the example of ships of the «Slice» type.

Keywords: multihull ship, total resistance, wave resistance, validity, algorithm.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие многокорпусных судов различного назначения. Область их применения достаточно обширна: пассажирские, автомобильно-пассажирские, научно-исследовательские, лоцманские, военные суда, суда доставки спецперсонала на буровые платформы, ветроэлектростанции и т. д. В результате научно-технического прогресса появились новые типы многокорпусных судов, находящиеся сейчас в эксплуатации или проходящие опытные испытания. К таким судам в первую очередь следует

отнести тримараны, пентамараны, суда типа «Slice». Для успешной разработки проектов многокорпусных судов требуются надежные способы определения мореходных качеств, а также необходимо решить ряд вопросов, связанных с исследованием особенностей расчета сопротивления движению. На этапе технического проектирования для расчета сопротивления и мощности главного двигателя, как правило, используют результаты модельных испытаний или компьютерного моделирования с помощью CFD-программ. При концептуальном этапе, когда многие главные

элементы судна еще не определены, используются различные приближенные способы определения сопротивления судна.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Проведенный авторами анализ публикаций по данному направлению показывает, что существует достаточно много работ, посвященных сопротивлению катамаранов [3, 8–11]. Значительно меньше исследований посвящено сопротивлению судов с малой площадью ватерлинии (СМПВ), тримаранов, пентамаранов и судов типа «Slice» [1, 2, 4, 5]. В большинстве публикаций рассматриваются приближенные методы, основанные на результатах испытаний серийных моделей судов, которые мало применимы на этапе концептуального проектирования. Поэтому для них целесообразно использовать теоретические методы расчета буксировочного сопротивления, основанные на теории волнового сопротивления.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — проведение исследований, направленных на разработку метода прогнозирования сопротивления многокорпусных судов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для расчета полного сопротивления многокорпусного судна предлагается использовать приближенный метод, в основу которого положены работы [6, 12, 13] с уточнениями для расчета волнового сопротивления. В соответствии с ним полное сопротивление судна определяется как сумма сопротивлений трения R_F , формы R_{VP} , волнового R_W , струйного R_{SP} , выступающих частей R_{AP} , шероховатостей R_A и воздуха R_{AA} :

$$R_T = R_F + R_{VP} + R_W + R_{SP} + R_{AP} + R_A + R_{AA}.$$

Для практического расчета полного сопротивления корпус многокорпусного судна целесообразно разделить на элементы. Для тримарана и пентамарана это центральный корпус и боковые поплавки (аутригеры); для СМПВ и «Slice» — подводный корпус и стойка (стойки). При рассмотрении тримарана с малой площадью ватерлинии к основным элементам также относятся стойки.

Поскольку сопротивление формы удобно искать через форм-фактор, то сопротивление трения судна, без учета выступающих частей, определяется по выражению [1, 5]:

$$R_F = \sum_{i=1}^n R_{F_i} (1 + k_i), \text{ кН},$$

где R_{F_i} , k_i — соответственно сопротивление трения и форм-фактор отдельного элемента корпуса судна; n — количество элементов корпуса.

Таким образом, с учетом разделения на основные элементы можно записать: для катамарана

$$R_F = 2R_{FH};$$

для СМПВ с одной стойкой на каждом корпусе

$$R_F = 2(R_{FS} + R_{FH});$$

для СМПВ с двумя стойками на каждом корпусе

$$R_F = 2(R_{FS} + R_{FH} + R_{FSA});$$

для тримарана

$$R_F = R_{FM} + 2R_{FO};$$

для судна типа «Slice»

$$R_F = 2(R_{FS} + R_{FSA} + R_{FH} + R_{FHA}),$$

где R_{FS} , R_{FH} , R_{FO} , R_{FSA} , R_{FHA} — соответственно сопротивления трения стойки, корпуса, аутригера, кормовой стойки и кормового корпуса, которые определяются по формуле

$$R_{F_i} = \frac{\rho U^2}{2} C_{F_i} A_i,$$

где U — скорость судна, м/с; C_{F_i} , A_i — коэффициент трения и площадь смоченной поверхности каждого элемента корпуса.

Площади смоченных поверхностей подводных корпусов, стоек и аутригеров определяются с использованием ординат теоретического чертежа судна.

Коэффициент трения каждого элемента корпуса рассчитывается по формуле

$$C_{Fi} = \frac{0,075}{(\log_{10} Re_i - 2)^2},$$

где Re_i — число Рейнольдса.

Волновое сопротивление судна включает в себя два главных компонента (волновое сопротивление отдельного элемента корпуса и сопротивление взаимодействия между этими элементами):

$$R_W = \sum_{i=1}^n R_{W_i} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n R_{W_{ij}}, \quad (1)$$

где R_{W_i} — собственное волновое сопротивление каждого из тел, входящих в состав многокорпусного судна, при их изолированном движении в жидкости; $\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^n R_{W_{ij}}$ — дополнительное волновое сопротивление вследствие волнового взаимодействия между телами.

Для катамарана

$$R_W = 2R_{WH} + R_{WHI}$$

где R_{WH} — волновое сопротивление одного корпуса, кН; R_{WHI} — волновое сопротивление вследствие взаимодействия корпусов, кН.

Для СМПВ катамаранного типа с одной стойкой на корпусе выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$R_W = 2(R_{WH} + 2R_{WHS} + R_{WS}),$$

где R_{WS} — волновое сопротивление стойки, кН; R_{WHS} — волновое сопротивление вследствие взаимодействия корпуса и стоек, кН.

Для двухстоечного варианта СМПВ формула (1) будет иметь вид

$$R_W = 2[R_{WH} + R_{WSF} + R_{WSA} + 2(R_{WHSF} + R_{WHSA} + R_{WSEFA})],$$

где R_{WSF} , R_{WSA} — волновые сопротивления соответственно носовой и кормовой стоек, кН; R_{WHSF} , R_{WHSA} , R_{WSEFA} — волновое

сопротивление от взаимодействия корпуса и носовой стойки, корпуса и кормовой стойки, носовой и кормовой стоек соответственно, кН.

Для тримарана $R_W = R_{WM} = 2R_{WO} + R_{WMO}$, где R_{WM} , R_{WO} — волновые сопротивления центрального корпуса и аутригера соответственно, кН; R_{WMO} — волновое сопротивление от взаимодействия корпуса и аутригера, кН.

Для судна типа «Slice»

$$R_W = 2[R_{WH} + R_{WHA} + R_{WSF} + R_{WSA} + 2(R_{WHSF} + R_{WHSA} + R_{WSEFA} + R_{WHASF} + R_{WHASA} + R_{WHWHA})],$$

где R_{WHA} — волновое сопротивление кормового корпуса, кН; R_{WHSF} , R_{WHSA} , R_{WSEFA} , R_{WHASF} , R_{WHASA} , R_{WHWHA} — волновые сопротивления от взаимодействия носового корпуса и носовой стойки, носового корпуса и кормовой стойки, носовой и кормовой стоек, кормового корпуса и носовой стойки, кормового корпуса и кормовой стойки, носового и кормового корпуса соответственно, кН.

Таким образом, дальнейший расчет сводится к определению указанных составляющих волнового сопротивления. Теоретическую основу алгоритма составляет теория узкого судна [7] (для стоек), тонкого тела (для подводных корпусов) [12, 13]. Учет взаимодействия между корпусами и стойками проводится на основе теории движения тонкого тела на глубокой воде вдоль плоской вертикальной стенки [6].

Считая корпуса «тонкими» симметричными и заменяя их воздействие на поток воды слоем источников, распределенных по диаметральной плоскости с интенсивностью, которая определяется по формуле $\sigma = \frac{U}{2\pi} \cdot \frac{\partial Y}{\partial x}$, можно получить следующее выражение для расчета составляющих волнового сопротивления СМПВ:

$$R_{Wl} = 16\pi\rho k_0^2 \int_0^{\pi/2} (I^2 + J^2) \frac{d\theta}{\cos^3 \theta}, \quad (2)$$

где I и J вычисляются по формулам

$$I(\theta) = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-T}^0 \sigma(x, z) \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \cos(k_0 x \sec \theta) dx dz ;$$

$$J(\theta) = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-T}^0 \sigma(x, z) \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \sin(k_0 x \sec \theta) dx dz ,$$

где $k_0 = g/U^2$ — волновое число.

При помощи интегрирования по частям интеграл (2) преобразовывается к интегралу от самой функции, а не ее производной [12]:

$$R_{\text{шп}} = \frac{8\rho g^4}{\pi U^6} \int_0^{\pi/2} (I^2 + J^2) \sec^5 \theta d\theta , \tag{3}$$

где

$$J(\theta) = - \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-T}^0 Y(x, z) \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \cos(k_0 x \sec \theta) dx dz ;$$

$$I(\theta) = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-T}^0 Y(x, z) \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \sin(k_0 x \sec \theta) dx dz ;$$

$Y(x, z)$ — ординаты теоретического чережа тел, входящих в состав многокорпусного судна.

При вычислении интеграла (3) возникают трудности, связанные с быстрым осциллированием подынтегральной функции. Для преодоления этого затруднения целесообразно использовать алгоритм [12], суть которого состоит в применении метода трапеций для интегрирования по z , метода Филона для интегрирования по x и метода Симпсона для интегрирования по θ . Вычисление интеграла проводится в следующем порядке. Интервал интегрирования по θ $[0, \pi/2]$ делится на N_θ равных участков. Для каждого полученного участка по правилу трапеций сначала вычисляется интеграл (для всех шпангоутов):

$$F(x, \theta) \approx \sum_{j=0}^{N_z} C_j Y(x, z_j) \exp(k_0 z_j \sec^2 \theta) \Delta z ,$$

где Δz — расстояние между ватерлиниями, м; N_z — количество ватерлиний; C_j — весовые коэффициенты, определяемые по формулам

$$C_0 = (e^k - 1 - K)/K^2;$$

$$C_{N_z} = (e^{-k} - 1 + K)/K^2;$$

$$C_j = (e^k - e^{-k} - 2)/K^2 \text{ — для всех } j \neq 0 \text{ и } N_z;$$

$$K = k_0 \sec^2 \theta \Delta z.$$

Затем, используя метод Филона, вычисляются интегралы:

$$J(\theta) \approx - \sum_{i=1}^{N_x-1} C_i F(x_i, \theta) \cos(k_0 x_i \sec \theta) \Delta x ;$$

$$I(\theta) \approx \sum_{i=1}^{N_x-1} C_i F(x_i, \theta) \sin(k_0 x_i \sec \theta) \Delta x ,$$

где Δx — расстояние между шпангоутами, м; N_x — количество шпангоутов; C_i — весовые коэффициенты, определяемые по формулам

$$C_{2i} = (3K + K \cos 2K - 2 \sin 2K)/K^3 \text{ — для всех четных } i;$$

$$C_{2i+1} = 4(\sin K - \cos K)/K^3 \text{ — для всех нечетных } i;$$

$$K = k_0 \sec \theta \Delta x.$$

После этого, используя метод Симпсона, проводится интегрирование по θ .

Для упрощения расчетов при разработке алгоритма учитывались особенности формы корпуса СМПВ. В частности было введено допущение о том, что стойки имеют одинаковую по высоте форму ватерлиний (что соответствует большинству построенных СМПВ). В связи с этим для описания формы

стойки достаточно знать ординаты на уровне конструктивной ватерлинии. Для повышения точности расчетов полученные ординаты аппроксимирова-

лись с помощью сплайнов. При принятых допущениях вычисление функций I и J интеграла волнового сопротивления стойки проводится по формулам

$$J(\theta) = - \int_{-L/2}^{L/2} Y(x) [1 - \exp(-k_0 h_s \sec^2 \theta)] \cos(k_0 x \sec \theta) dx;$$

$$I(\theta) = \int_{-L/2}^{L/2} Y(x) [1 - \exp(-k_0 h_s \sec^2 \theta)] \sin(k_0 x \sec \theta) dx.$$

Различные виды взаимодействия элементов корпуса можно определить по следующим зависимостям:

$$R_{WU} = \frac{8\rho g^4}{\pi U^6} \int_0^{\pi/2} (C_I C_J + S_I S_J) \sec^5 \theta d\theta,$$

где $S_j(\theta) = 2 \cos(k_0 y_{sj} / 2 \sin \theta \sec^2 \theta) \{ J_j(\theta) \cos(k_0 x_{sj} \sec \theta) + I_j(\theta) \sin(k_0 x_{sj} \sec \theta) \};$

$$C_j(\theta) = 2 \cos(k_0 y_{sj} / 2 \sin \theta \sec^2 \theta) \{ -J_j(\theta) \sin(k_0 x_{sj} \sec \theta) + I_j(\theta) \cos(k_0 x_{sj} \sec \theta) \}$$

(x_{sj} — продольное расстояние между элементами корпуса (выдвиг); y_{sj} — поперечное расстояние между диаметрными плоскостями элементов корпуса (горизонтальный клиренс)).

Остальные составляющие полного сопротивления определяются по известным из теории корабля формулам.

После расчета полного сопротивления судна определяется мощность главного двигателя. Для этого рассчитывается величина буксировочной мощности по выражению $P_E = R_T U$, кВт.

Мощность главных двигателей

$$P = \frac{P_E}{\eta_s \eta_D} (SM + 1), \text{ кВт},$$

где η_s — пропульсивный коэффициент, значение которого принимается в зависимости от типа движителя; η_D — КПД передачи мощности от двигателя к движителю (для газотурбинной установки, высоко- и среднеоборотного дизелей $\eta_D = 0,97$; для дизель-электрической и газотурбоэлектрической установок $\eta_D = 0,88 \dots 0,92$); SM — коэффициент,

учитывающий запас мощности. Для многокорпусных судов, как правило, принимается равным 10...15 %.

Предложенный метод позволяет выполнить расчет полного сопротивления многокорпусных судов различных типов, в том числе и судов с малой площадью ватерлинии. Данный метод расчета полного сопротивления был реализован в виде компьютерной программы, с помощью которой выполнены некоторые тестовые расчеты.

Для оценки достоверности расчетов было выполнено тестирование программы на примере данных работы [12] для судна «Slice» путем сравнения результатов, полученных по разработанной программе, с результатами расчета по программе «Michlet». Некоторые результаты тестов представлены на рис. 1–2.

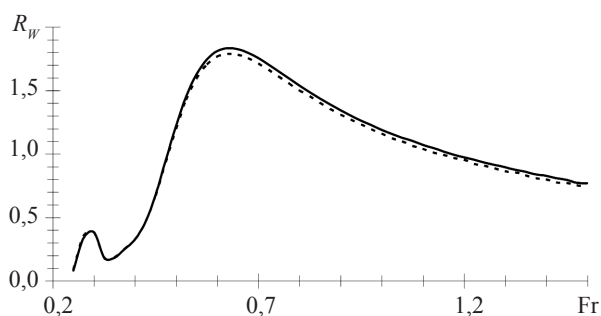


Рис. 1. Результаты сравнения расчета волнового сопротивления для «Slice» с разными носовым и кормовым горизонтальными клиренсами:
 - - - - - разработанная программа; — программа «Michlet»

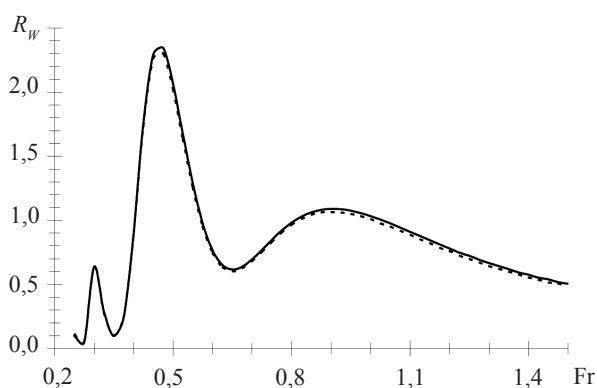


Рис. 2. Результаты сравнения расчета волнового сопротивления для «Slice» с одинаковыми носовым и кормовым горизонтальными клиренсами

Как показал расчет, средняя квадратическая погрешность не превышает 3,5 %.

ВЫВОД

Разработанный алгоритм расчета полного сопротивления многокорпус-

ных судов и созданная на его основе компьютерная программа могут использоваться при концептуальном проектировании для решения задач определения ходкости, оптимизации формы корпуса и выбора оптимальных проектных характеристик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Bertram, V.** SWATH Ship Design Formulae Based on Artificial Neural Nets [Text] / V. Bertram, E. Mesbahi // Journal of Ship Technology. — 2007. — Vol. 3, Nr 1. — P. 1–9.
- [2] High-Speed Trimaran Drag: Numerical Analysis and Model Tests [Text] / I. Mizine, E. Amromin, L. Crook, W. Day, R. Korpus // Journal of Ship Research. — 2004. — Vol. 48, Nr 3. September. — P. 248–259.
- [3] **Insel, M.** An investigation into resistance components of high-speed displacement catamarans [Text] / M. Insel, A. F. Molland // Trans. of Royal Institute of Naval Architects. — 1992. — Vol. 134. — P. 1–20.

- [4] **Li, P.-Y.** Study of trimaran wavemaking resistance with numerical calculation and experiments [Text] / P.-Y. Li, Y.-M. Qiu, M.-T. Gu // *Journal of Hydrodynamics*. — 2002. — Ser. B, Nr 2. — P. 99–105.
- [5] **Lin, W. C.** The Still-Water Resistance and Powering Characteristics of Small Waterplane-Area Twin-Hulled (SWATH) Ships [Text] / W. C. Lin, W. G. Jr. Day // *AIAA/SNAME: Advanced Marine Vehicles Conf.*, 25–27 February 1974. — San Diego, 1974.
- [6] **Lunde, J. K.** On the Linearized Theory of Wave Resistance for Displacement Ships in Steady and Accelerated Motion [Text] / J. K. Lunde // *SNAME Transactions*. — 1951. — Vol. 59. — P. 25–85.
- [7] **Michell, J. H.** The Wave-Resistance of a Ship [Text] / J. H. Michell // *Philosophical Magazine*. — 1898. — Ser. 5, Vol. 45. — P. 106–123.
- [8] **Molland, A. F.** Resistance Experiments on a Systematic Series of High Speed Displacement Catamaran Forms: Variation of Length-Displacement Ratio and Breadth-Draft Ratio [Text] / A. F. Molland, J. F. Wellicome, P. R. Couser // *Ship Science Report*. — 1994. — Nr. 71. — 84 p.
- [9] **Pham, X. P.** Wave Resistance Prediction of Hard-Chine Catamarans through Regression Analysis [Text] / X. P. Pham, K. Kantimahanthi, P. K. Sahoo // *Proc. 2-nd International Euro Conference on High Performance Marine Vehicles (HIPER'01)*, 2–5 May 2001. — Hamburg, 2001. — P. 382–394.
- [10] **Sahoo, P. K.** Practical evaluation of resistance of high-speed catamaran hull forms. — Part I [Text] / P. K. Sahoo, M. Salas, A. Schwetz // *Ships and Offshore Structures*. — 2007. — Vol. 2, Nr. 4. — P. 307–324.
- [11] **Subramanian, V. A.** A Method for rapid Hull Form Development and Resistance Estimation of Catamarans [Text] / V. A. Subramanian, P. Joy // *Trans. of Marine Technology*. — 2004. — Vol. 38, Nr 1. — P. 5–11.
- [12] **Tuck, E. O.** Wave Resistance of Thin Ships and Catamarans : Report T8701 [Text] / E. O. Tuck / Department of Applied Mathematics, The University of Adelaide. — Adelaide, 1987. — 21 p.
- [13] **Tuck, E. O.** Some Methods for Flows Past Blunt Slender Bodies [Text] / E. O. Tuck // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1964. — Nr 18. — P. 619–635.