

УДК 532.58

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ ВОДЫ РАЗМЕРЕНИЙ БОЛЬШЕГРУЗНОГО КАТАМАРАНА И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОПЛАВКОВ-БУЛЬБОВ

Кожевников Артур Игоревич¹, аспирант

e-mail: nertenro@ro.ru

Чебан Егор Юрьевич¹, доцент, доктор технических наук, профессор кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов

e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Одним из способов снижения волнового сопротивления большегрузного катамарана является размещение в междукорпусном пространстве дополнительных тел - поплавков-бульбов, которые за счет создания собственных волн могут загасить интерференционные волны, образующиеся корпусами самого судна. Положительный эффект возникает при правильно подобранных параметрах поплавок-бульба: его размерений, формы тела и положения по длине судна. Однако при установке поплавок-бульба также повышается общее сопротивление трения, зависящее от площади смоченной поверхности, которая в свою очередь при постоянных главных размерениях может быть уменьшена за счет изменения формы. Таким образом, для оценки общего влияния должны быть учтены обе составляющие сопротивления движению воды. В работе приведены усовершенствованные аналитические выражения, на основе которых могут быть выполнены систематические расчеты по оценке влияния установленного в междукорпусном пространстве поплавок-бульба при движении на глубокой и тихой воде. Представленные усовершенствованные аналитические выражения выведены на основе математических преобразований известных формул, путем введения в подынтегральное выражение для волнового сопротивления уравнения эллипсоида, как наиболее обтекаемого тела, а также использованием поправочных коэффициентов и формул для смоченной поверхности различных форм тела, полученных на основе аппроксимации данных математического моделирования, выполненного ранее. В заключительной части приведены различные графики зависимостей влияния на сопротивление движению воды большегрузного катамарана размерений корпусов, горизонтального клиренса, а также формы, размерений и расположения поплавков-бульбов, полученные в разработанной на языке Python программе, предназначенной для автоматизации расчетов.

Ключевые слова: сопротивление движению воды, интегралы волнового сопротивления, большегрузный катамаран, поплавок-бульб, площадь смоченной поверхности, снижение сопротивления движению, расчет сопротивления движению.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE DIMENSIONS OF A HEAVY-DUTY CATAMARAN AND THE DESIGN PARAMETERS OF BULB FLOATS ON WATER RESISTANCE

Artur I. Kozhevnikov¹, Doctoral Student

e-mail: nertenro@ro.ru

Egor Yu. Cheban¹, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environmental Safety of Ships

e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. One way to reduce wave drag on a heavy-duty catamaran is to install additional bodies in the interhull space—bulb floats. These floats, by creating their own waves, can dampen the interference waves generated by the vessel's hulls. This positive effect occurs with properly selected bulb float parameters: its dimensions, body shape, and position along the length of the vessel. However, installing a bulb float also increases the overall frictional drag, which depends on the wetted surface area, which, in turn, with constant principal dimensions, can be reduced by changing the shape. Therefore, to assess the overall impact, both components of water resistance must be taken into account. This paper presents improved analytical expressions that can be used to perform systematic calculations to assess the impact of a bulb float installed in the interhull space when navigating in deep, calm water. The presented improved analytical expressions are derived from mathematical transformations of known formulas, by introducing the ellipsoid equation as the most streamlined body into the integrand for wave drag, as well as by using correction factors and formulas for the wetted surface of various body shapes, obtained by approximating data from previously performed mathematical modeling. The final section presents various graphs of the influence of hull dimensions, horizontal clearance, and the shape, dimensions, and location of the bulbous floats on the water resistance of a heavy-lift catamaran. These graphs were obtained using a Python program designed to automate the calculations.

Keywords: resistance to water movement, integrals of wave resistance, heavy-duty catamaran, bulb float, wetted surface area, reduction of resistance to movement, calculation of resistance to movement.

Повышение скорости перемещения грузов на внутренних водных путях может быть достигнуто за счет использования большегрузных катамаранных судов, которые по сравнению с однокорпусными судами, имеют повышенную остойчивость и вместимость. М.Я. Алферьев [1], рассматривая вопрос о гидродинамических преимуществах катамаранов, отмечал, что при повышении скорости хода вместе с увеличением волнового сопротивления возрастает интенсивность корабельных волн, размывающих берега и вызывающих порчу судоходной обстановки. Дополнительно могут возрасти нагрузки на соединительный мост из-за перепада высот генерируемых корпусами волн в междукорпусном пространстве и по внешним бортам судна. Для снижения волнового сопротивления могут использоваться поплавок-бульба, установленные в междукорпусном пространстве, правильная форма и размещение которых может привести к положительному изменению интерференционной картины, образующейся в результате взаимодействия волн, генерируемых корпусами, и волн, генерируемых поплавком-бульбом, путем их взаимного гашения [2]. При оптимальном подборе геометрии и положения поплавков-бульбов его волновая система накладывается на волны корпусов в противофазе, что приводит к снижению амплитуды результирующей волны и, как следствие, к уменьшению волнового сопротивления. Например, в исследованиях [3] отмечено снижение волнового сопротивления более чем на 10% при $Fr=0,7$. Однако при установке поплавок-бульба также повышается общее сопротивление трения, зависящее от площади смоченной поверхности,



которая в свою очередь при постоянных главных размерениях может быть уменьшена за счет изменения формы. Таким образом, для оценки общего влияния должны быть учтены все составляющие сопротивления движению воды.

Подбор правильной геометрии и формы тела для каждого конкретного судна может быть проведен на этапе исследовательского проектирования, используя аналитические выражения, позволяющие выполнять систематические расчеты и дальнейший анализ. Автоматизация данного процесса позволит существенно сократить время на поиск оптимальных параметров.

Аналитические выражения для исследования сопротивления движению воды

Для определения волнового сопротивления катамаранного судна, представляющего собой два корпуса, установленных параллельно, используются решения для случая движения судна вдоль твердой стенки на основе формул, полученных Лунде [4]. В случае размещения в междукорпусном пространстве поплавок-бульба, задачу о волновом сопротивлении судна можно рассмотреть с точки зрения гидродинамического комплекса из конечного числа тел: двух корпусов и тел, размещаемого в междукорпусном пространстве. В рамках линейной теории волнового сопротивления тела могут быть заменены воздействием совокупности источников и стоков, как, например, было сделано Эггерсом [5]. Используя метод М.Г. Крейна, согласно которому потенциал скоростей, вызванных в жидкости движущимся телом, представляется в виде суммы двух гармонических функций вне поверхности тела и во всем пространстве водоема жидкости, включая и объем внутри тела, можно получить формулу для расчета волнового сопротивления катамаранного судна, в междукорпусном пространстве которого размещен поплавок-бульб. Следуя методу Г.Е. Павленко, в исследованиях [6], выполненных С.В. Маловой под руководством М.Я. Алферьева, были получены формулы для расчета волнового сопротивления катамаранного судна с профилированным участком соединительного моста, входящего в воду. Однако данные выражения не учитывают форму поплавок-бульба, а лишь главные размерения. Сопротивления трения корпуса судна и для поплавок-бульба могут быть определены по формулам, представленным в [1], однако для поплавок-бульба требуется поправочный коэффициент для расчета волнового сопротивления, учитывающий нелинейность волновых эффектов и компенсирующий погрешность из-за допущений теории тонкого корабля (Мичелла).

На основе результатов исследований [7] путем аппроксимации данных были выведены следующие формулы для расчета смоченной поверхности поплавок-бульба для тел формы эллипсоида, модифицированного тела Вигли и цилиндра с обтекателями:

$$\begin{aligned} S_{\text{сп. п. эллипсоида}} = & L \cdot B \cdot (0.675688 + 64.424208 \cdot (T/L) - 18.664966 \cdot \\ & \cdot (B/L) - 282.875439 \cdot (T/L)^2 - 39.170600 \cdot (T/L) \cdot (B/L) + 62.319286 \cdot \\ & \cdot (B/L)^2 + 36.638431 \cdot (T/L)^3 + 238.468964 \cdot (T/L)^2 \cdot (B/L) - 7.509907 \cdot \\ & \cdot (T/L) \cdot (B/L)^2 - 43.539728 \cdot (B/L)^3) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{см. п. мод. т. Вигли}} = & L \cdot B \cdot (1.139112 + 36.664663 \cdot (T/L) - 19.071894 \cdot \\ & \cdot (B/L) - 348.870720 \cdot (T/L)^2 + 148.959444 \cdot (T/L) \cdot (B/L) + 47.756697 \cdot \\ & \cdot (B/L)^2 + 728.809216 \cdot (T/L)^3 - 285.890812 \cdot (T/L)^2 \cdot (B/L) + 2.873453 \cdot \\ & \cdot (T/L) \cdot (B/L)^2 - 75.006135 \cdot (B/L)^3) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} S_{\text{см. п. цилиндр}} = & L \cdot B \cdot (0.425602 + 78.800657 \cdot (T/L) - 7.491012 \cdot \\ & \cdot (B/L) - 460.356167 \cdot (T/L)^2 - 107.739859 \cdot (T/L) \cdot (B/L) + 37.561147 \cdot \\ & \cdot (B/L)^2 - 224.369945 \cdot (T/L)^3 + 1095.759284 \cdot (T/L)^2 \cdot (B/L) - \\ & - 120.498269 \cdot (T/L) \cdot (B/L)^2 - 26.576548 \cdot (B/L)^3) \end{aligned} \quad (3)$$

Вычисленные результаты подставляются в формулу, приведенную в [1], для расчета сопротивления трения $R_{тр}$ поплавок-бульба. Расчет сопротивления трения корпусов судна производится на основе формул, представленных М.Я. Алферьевым в этом же источнике без изменений.

Описывая форму эллипсоида функцией в виде $y(x, z) = (1 - x^2)(1 - z^2)$ в подынтегральных выражениях J , приведенных в [1] и [6] как для корпусов судна, так и для поплавок-бульба, и раскрывая получившийся интеграл, получим следующее выражение:

$$J(\theta) = \frac{4 \cdot (\sin n_{п.б.} - n_{п.б.} \cdot \cos n_{п.б.})}{n_{п-б}^3} \cdot \frac{m_{п.б.}^2 + 2 \cdot \exp^{-m_{п.б.}} \cdot (m_{п.б.} + 1) - 2}{m_{п.б.}^3}, \quad (4)$$

где коэффициенты m и n рассчитываются по формулам:

$$m = \frac{T_{п.б.}}{L_{п.б.} \cdot Fr_{п.б.}^2 \cdot \cos^2 \theta} \quad (5)$$

$$n = \frac{1}{2 \cdot Fr_{п.б.}^2 \cdot \cos \theta} \quad (6)$$

Для минимизации погрешности при расчете сопротивления движению воды, вызванного поплавок-бульбом, введем дополнительно умножение $R_{волн.п.б.}$, $\Delta R_{волн.вз.корп_и_п.б.}$ и $R_{тр.п.б.}$ на следующие поправочные коэффициенты для форм эллипсоида, модифицированного тела Вигли и цилиндра с обтекателями, выведенные на основе аппроксимации данных исследований [7]:

$$k_{\text{эллипсоид}} = 0,8024 - 2,3322 \cdot \frac{B}{L} + 0,1687 \cdot Fr + 2,0349 \cdot \frac{T}{L} \quad (7)$$

$$k_{\text{мод.тел.Вигли}} = 0,7224 - 2,9666 \cdot \frac{B}{L} + 0,1848 \cdot Fr + 3,3312 \cdot \frac{T}{L} \quad (8)$$

$$k_{\text{цилиндр}} = 0,9133 - 1,1077 \cdot \frac{B}{L} + 0,1438 \cdot Fr + 3,4058 \cdot \frac{T}{L} \quad (9)$$

Подставляя выражения, приведенные выше, в выражения, приведенные в [1] и [6], получаем формулы, с помощью которых могут быть проведены систематические расчеты оценки влияния, установленного в междукорпусном пространстве поплавок-бульба на волновое и полное сопротивление движению воды всего гидродинамического комплекса, состоящего из корпусов судна и поплавок-бульба:

$$R_{\text{компл.отн.волн.}} = \frac{R_{\text{корп.кат.волн.}} + \Delta R_{\text{волн.вз.корп.}} + R_{\text{волн.п.б.}} + \Delta R_{\text{волн.вз.корп_и_п.б.}}}{R_{\text{корп.кат.волн.}} + \Delta R_{\text{волн.вз.корп.}}} \quad (10)$$

$$R_{\text{компл.отн.}} = \frac{R_{\text{тр.компл.}} + R_{\text{волн.компл.}}}{R_{\text{тр.кат.}} + R_{\text{волн.кат.}}} \quad (11)$$

В случаях, когда $R_{\text{компл.отн.волн.}} < 1$, гидродинамическое взаимодействие оказывает благоприятное воздействие на волновое сопротивление большегрузного катамарана, оборудованного поплавок-бульбом, а при $R_{\text{компл.отн.}} < 1$ на полное сопротивление. При

расчете подразумевается, что поплавков-бульб это симметричное тело, размещаемое в диаметральной плоскости судна, а изменение положения по длине судна задается координатой середины поплава-бульба $x_{\text{центр_п.б.}}$, которая отсчитывается от плоскости мидель-шпангоута судна в сторону его носа.

Результаты и обсуждения

Для автоматизации выполняемых расчетов в среде Visual Studio Code на языке Python была разработана программа, зарегистрированная в Федеральной службе по интеллектуальной собственности за № 2026663540. В результате проведения расчетов с использованием данной программы были получены зависимости относительных полного и волнового сопротивлений движению воды катамаранного судна с установленным в междукорпусном пространстве поплавком-бульбом, при изменении различных параметров, представленные на Рисунках 1-3.

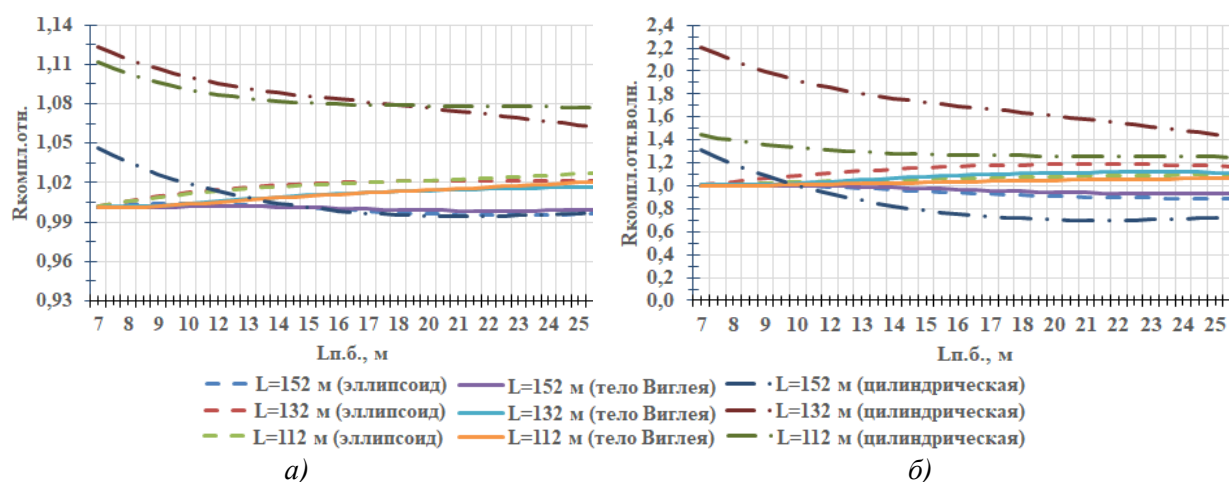


Рисунок 1 – Зависимости относительных величин полного и волнового сопротивлений движению воды от длины поплава-бульба для различных длин корпусов катамаранного судна при заданных постоянных параметрах: $V_{\text{кат}}=9$ м, $T_{\text{кат}}=2.8$ м, $b_{\text{кат}}=9$ м, $v=8$ м/с, $\xi_{\text{шер.кат.}}=0.6$, $V_{\text{п.б.}}=2.93$ м, $T_{\text{п.б.}}=0.465$ м, $x_{\text{центр_п.б.}}=40$ м (в легенде подписей для длины корпуса в скобках указана используемая при расчетах форма поплава-бульба)

На рис. 1 стоит отметить, что в случае установки в междукорпусном пространстве большегрузного катамарана с главными размерениями: $L_{\text{кат}}=152$ м, $V_{\text{кат}}=9$ м, $T_{\text{кат}}=2.8$ м, $b_{\text{кат}}=9$ м поплава-бульба цилиндрической формы при $L_{\text{п.б.}}=22$ м, $V_{\text{п.б.}}=2.93$ м, $T_{\text{п.б.}}=0.465$ м и центре размещения в диаметральной плоскости судна и на расстоянии 40 метров в нос от плоскости мидель-шпангоута судна, можно достичь снижения волнового сопротивления на 20% и полного на 1%. Для катамарана с длиной 132 м установка поплава-бульба при заданных параметрах судна приводит только к увеличению обоих сопротивлений.

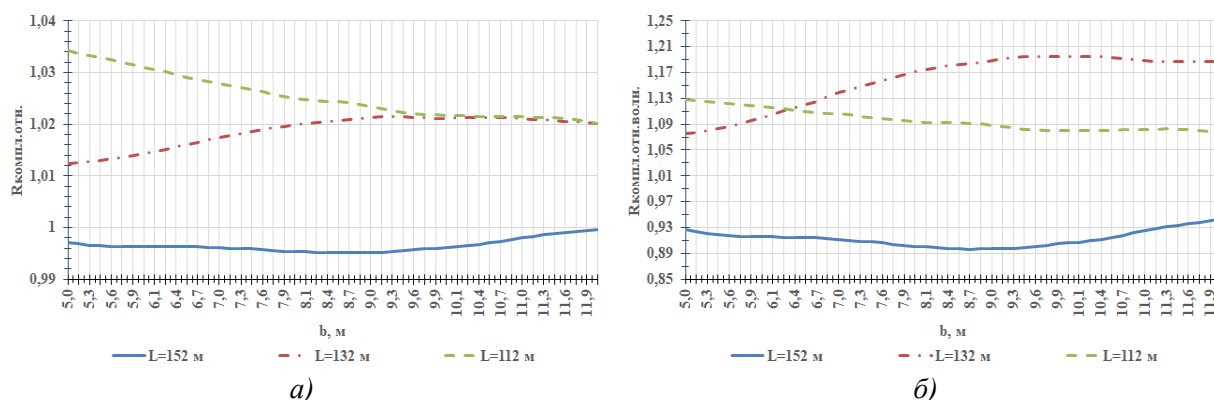


Рисунок 2 – Зависимости относительных величин полного (а) и волнового (б) сопротивлений движению воды при различных клиренсах для катамаранного судна с различными длинами корпусов и поплавком-бульбом эллипсоидной формы при заданных постоянных параметрах:

$$B_{кат}=9 \text{ м}, T_{кат}=2.8 \text{ м}, b_{кат}=9 \text{ м}, v=8 \text{ м/с}, \xi_{шер.кат.}=0.6, \\ L_{п.б.}=22 \text{ м}, B_{п.б.}=2.93 \text{ м}, T_{п.б.}=0.465 \text{ м}, x_{центр.п.б.}=40 \text{ м}$$

На рис. 2 видно, что изменение горизонтального клиренса (расстояния между внутренними бортами большегрузного катамарана) также оказывает существенное влияние на гидродинамическое взаимодействие. Так, при длине судна 152 м, во всем исследуемом диапазоне будет снижаться волновое и полное сопротивления, а максимальное снижение будет достигаться при 8,7 м. Для остальных случаев идет лишь увеличение обоих сопротивление.

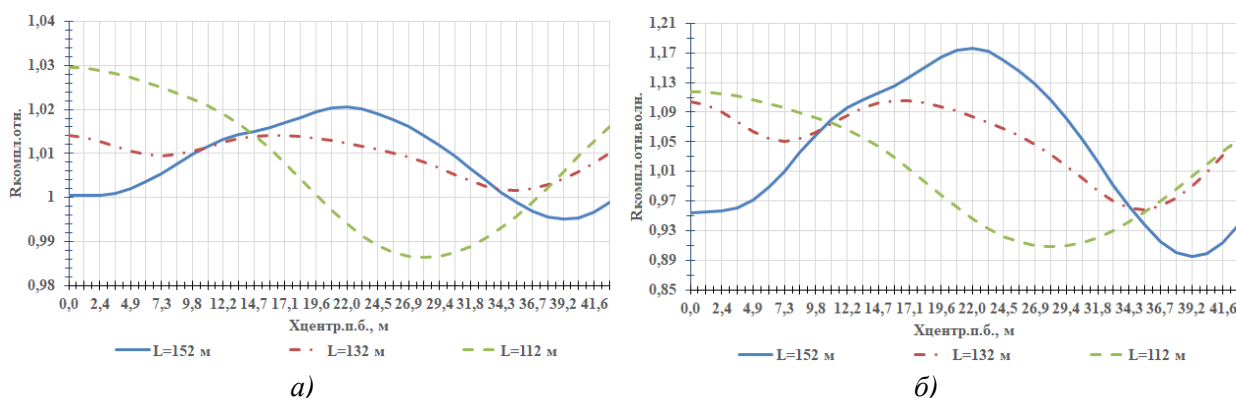


Рисунок 3 – Зависимости относительных величин полного (а) и волнового (б) сопротивлений движению воды при различных положениях центра поплавка-бульба эллипсоидной формы для катамаранного судна с различными длинами корпусов при заданных постоянных параметрах:

$$B_{кат}=9 \text{ м}, T_{кат}=2.8 \text{ м}, b_{кат}=9 \text{ м}, v=8 \text{ м/с}, \xi_{шер.кат.}=0.6, L_{п.б.}=22 \text{ м}, \\ B_{п.б.}=2.93 \text{ м}, T_{п.б.}=0.465 \text{ м}, B_{п.б.}=2.93 \text{ м}$$

По рис. 3 можно оценить влияние расположение центра поплавка-бульба, откладываемого в нос по диаметральной плоскости от плоскости мидель-шпангоута большегрузного катамарана. Так, при размещении центра поплавка-бульба на расстоянии 40 метров при длине корпуса 152 м будет наблюдаться наиболее благоприятный эффект по снижению сопротивлений, однако неправильный выбор размещения при 22 м оказывает неблагоприятный эффект по увеличению волнового сопротивления на 17%.

Заключение

В настоящей работе приведены усовершенствованные формулы для оценки влияния устанавливаемого в междукорпусном пространстве большегрузного катамарана поплавка-

бульба. На основе выведенных формул представлены результаты расчетов, полученные с помощью разработанной на язык Python программы. Представленные зависимости наглядно показывают влияние размерений корпусов судна, параметров движения, а также размерений и формы поплавок-бульба на сопротивление движению воды. Опираясь на полученные значения, можно вычислить параметры поплавок-бульба, при которых обеспечивается наиболее благоприятное гидродинамическое взаимодействие. Полученные формулы и разработанная программа могут быть полезны при проектировании судов подобной конструкции.

Список литературы:

1. Транспортные катамараны внутреннего плавания. / М.Я. Алферьев., Г.С. Мадорский. – М.: Транспорт, 1976 г. – 336 с.
2. Чебан Е.Ю., Кожевников А.И., Бушков С.В. Особенности волнообразования некоторых тел простой формы при больших числах фруда.//Транспорт. Горизонты развития. 2023: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2023. – URL: http://вф-река-море.пф/2023/3_15.pdf (дата обращения: 10.04.2026).
3. Hadi, E. S. Size Optimization of Foil-shaped Center Bulb on Catamaran Hull Form to Reduce Resistance / E. S. Hadi, M. Iqbal, G. Pranamya // Proceedings of the 7th International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, Environmental and Natural Disaster Management (ISOCEEN 2019). – Surabaya : SCITEPRESS, 2019. – P. 67–75. – DOI 10.5220/0010055600670075. – URL: <https://www.scitepress.org/Papers/2019/100556/100556.pdf> (дата обращения: 06.05.2026). – Текст : электронный.
4. Lunde S. Wave Resistance Calculation at High Speed. TINA, 1949
5. Eggers K. Über die Erfassung der Widerstandserhöhung im Seegang durch Energiebetrachtungen № 22 1955. <https://doi.org/10.15480/882.520>
6. Малова С.В. Исследование влияния соединительного моста на волновое сопротивление катамарана: Дис. ... канд. техн. наук / С.В. Малова. – Горький, 1969. – 156 с.
7. Чебан Е.Ю., Кожевников А.И., Никущенко Д.В. Оценка параметров волн при движении некоторых тел простой формы в свободном потоке численными методами. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2025;(79):39-51. EDN: GIZBFY

