

УДК 531.391.1:532.5.011
DOI: 10.37890/jwt.vi78.456

Исследование волнообразования поплавков для использования в качестве бульбов большегрузных катамаранов

Е.Ю. Чебан

ORCID: 0000-0002-0983-9879

А.И. Кожевников

ORCID: 0000-0001-9013-8510

Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Использование речных большегрузных катамаранов для организации судоходства может повысить привлекательность перевозок по внутренним водным путям за счет повышения скорости судов. Уменьшение волнового сопротивления для такого типа судов остается актуальным вопросом как с позиции предотвращения разрушения берегов, ложа водоемов и прибрежных сооружений, снижения волновых нагрузок на мост катамарана. Одним из способов снижения волнового сопротивления, является размещение поплавок-бульба между корпусами катамарана, что подтверждается ранее выполненными исследованиями. В работе представлены аналитические выражения для определения сопротивления комплекса поплавок-катамаран, а также формулы позволяющие рассчитать основные параметры поплавок-бульба. Приведены результаты численного моделирования для поплавков в виде эллипсоидов в диапазоне скоростей 7,0 – 11,7 м/с, которые соответствуют малоисследованному диапазону чисел Фруда от 0,2 до 0,3 для речных катамаранов длиной 112 – 152 м. Полученные данные позволяют предполагать, что эллипсоид не является оптимальной формой поплавок-бульба и данный вопрос требует дополнительного изучения.

Ключевые слова: речные большегрузные катамараны, бульбы, выступающие части, волнообразование катамаранов, воздействие на прибрежные сооружения, численное моделирование, волновое сопротивление, составляющие сопротивления, соединительные мосты, поплавки.

The study of float wave formation for the usage as heavy-duty catamaran bulbs

Egor Yu. Cheban

ORCID: 0000-0002-0983-9879

Artur I. Kozhevnikov

ORCID: 0000-0001-9013-8510

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The use of river heavy-duty catamarans for navigation can increase the attractiveness of inland waterway transportation by increasing the speed of ships. Reducing wave resistance for this type of vessel remains an urgent issue both from the point of view of preventing the bank, reservoir bed, coastal structure destruction, and reducing the wave loads on the catamaran bridge. One of the ways to reduce wave resistance is to place a float-bulb between the catamaran hulls, which is confirmed by previously performed studies. The paper presents analytical expressions for determining the resistance of the bulb-catamaran complex, as well as formulas for calculating the main parameters of the float-bulb. The results of numerical modeling for ellipsoid floats in the speed range 7.0 – 11.7 m/s are presented, which correspond to the rarely-studied range of Froude numbers from 0.2 to 0.3 for river

catamarans with the length of 112 - 152 m. The data obtained suggest that the ellipsoid is not the optimal shape of the float-bulb and this issue requires additional study.

Keywords: river heavy-duty catamarans, bulbs, protruding parts, catamaran wave formation, impact on coastal structures, numerical modeling, wave resistance, resistance components, connecting bridges, floats.

Введение

Важную роль в волновом сопротивлении движущихся в жидкости тел, в том числе катамаранного судна, играет сопротивление, возникающее в результате волновых систем каждого из тел, вследствие чего волновое сопротивление системы может быть, как больше, так и меньше суммы волновых сопротивлений каждого тела при изолированном движении. В ряде случаев, высоты волн между корпусами катамаранного судна могут превышать волны, генерируемые по наружному борту, и оказывают существенное влияние на волновое сопротивление, а также на прочность и соответственно конструкцию моста катамарана. Для уменьшения высот волн между корпусами используются различные конструкции, в первую очередь предназначенные для разрушения волн наибольшей высоты. С другой стороны, изменение параметров волн может быть достигнуто за счет генерации волн специальной формой нижней части моста или поплавками (межкорпусными бульбами) различной формы, расположенными в междукорпусном пространстве катамарана.

С точки зрения физики, задача о движении системы тел представляет собой смешанную краевую задачу для уравнения Лапласа с линейными граничными условиями. Волновое сопротивление зависит от относительного положения тел в системе. Комплекс из корпуса судна и поплавок (бульба) может иметь меньшее волновое (и полное) сопротивление по сравнению с волновым (и полным) сопротивлением корпуса без бульба. Это возможно лишь в случае, если волновое сопротивление влияния меньше нуля, а модуль его больше, чем сумма собственного волнового сопротивления и сопротивления трения бульба. Иными словами, в результате взаимодействия дополнительной системы бульба с основной системой волн корпуса происходит благоприятный процесс интерференции, снижающий общее волновое сопротивление системы. Данные обстоятельства подтверждаются рядом исследований.

Наиболее интересна работа А. Mandru и F. Racuрагу из Университета Галаца, 2020 г. [1], в которой описаны экспериментальные исследования в опытовом бассейне по улучшению гидродинамических характеристик катамаранов с помощью установки поплавок-бульба между корпусами. С моделями катамарана масштабе 1:32 были проведены буксировочные в диапазоне чисел Фруда от 0,2 до 0,8, при различных конфигурациях поплавок-бульба (3 глубины и 2 положения вдоль корпуса (нос и корма), рис.1). Поплавок-бульб представлял собой эллипсоид длиной 7,2 м, диаметром 1,44 м.

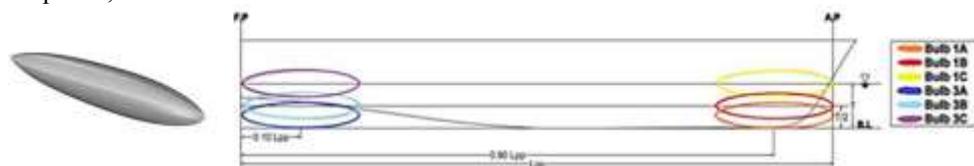


Рис. 1. Форма поплавок-бульба и варианты его размещения: А (ось эллипсоида совпадает с ватерлинией), В (ось эллипсоида находится на половине осадки), С (ОП эллипсоида совпадает с ОП катамарана) – положение по глубине; 1 – размещение в носу; 3 – размещение в корме. Cat – катамаран без бульба.

Анализируя полученные А. Mandru и F. Pacuraru графики изменения коэффициента остаточного сопротивления (рис. 2), можно отметить, что все кривые имеют максимум при числе $Fr=0,5$, которое по всей видимости является критическим значением. В диапазоне чисел Фруда 0,4-0,6 (рис.2) коэффициенты остаточного сопротивления для катамарана с поплавками-бульбами оказываются меньше, чем без них. Существенное снижение на 7,53% наблюдается при положении бульба 3С – в корме на уровне ватерлинии катамарана. Самое низкое значение коэффициента сопротивления зафиксировано при числе Фруда 0,3.

В диапазоне чисел Фруда 0,2-0,3 наблюдается разброс значений коэффициентов остаточного сопротивления для всех случаев расположения поплавок-бульба, что согласуется с результатами [2] для речных катамаранов. Аналогичное исследование было выполнено Goutam Kumar Saha, Kazuo Suzuki, and Hisashi Kai [3], для оптимизации корпуса высокоскоростного катамарана с носовыми и кормовыми поплавками-бульбами численными методами. Результаты приведены на рис. 3. Исследовалось волновое сопротивление при числах Фруда 0,45 и 0,5 и получено, что волновое сопротивление катамарана при использовании носовых и кормовых поплавков-бульбов снижается примерно на 28% при $Fr=0,45$, а при $Fr=0,5$ до 40% по сравнению с катамараном без поплавков-бульбов. В работе D.B. Danisman [4] показана возможность снижения волнового сопротивления катамарана с поплавками-бульбами и для числа Фруда 0,6 отмечено снижение волнового сопротивления на 15%. Выполненное в работе численное моделирование подтверждено экспериментом.

Результаты выше описываемых исследований показывают, что использование поплавок-бульба позволяет значительно снизить высоты волн, генерируемых корпусом катамарана, и уменьшить волновое сопротивление.

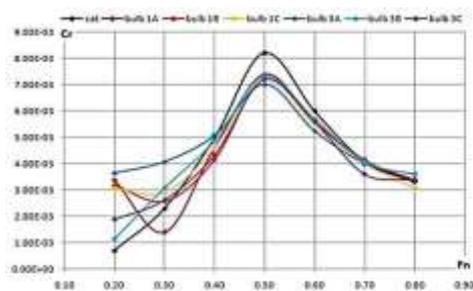


Рис. 2. Кривые изменения коэффициента остаточного сопротивления

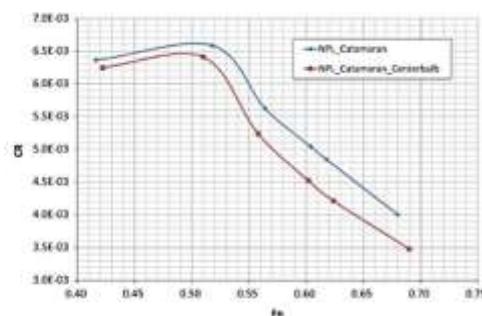


Рис. 3. Сравнение кривых коэффициентов сопротивления катамаранов с поплавок-бульбом (красная) и без него (синяя)

Необходимо отметить, что в основном работы в области снижения волнового сопротивления катамаранов посвящены скоростным морским катамаранам, движущимся со скоростями при $Fr > 0,3$ или для очень большого диапазона изменения числа Фруда и не охватывают большегрузные речные катамараны больших размерений. Кроме того, с точки зрения проектирования большегрузных катамаранов необходимо уметь определять форму поплавок-бульба, его расположение относительно корпусов катамарана и диапазон скоростей, в котором его использование будет эффективно снижать волновое сопротивление.

1. Особенности волнового сопротивления катамарана с дополнительными поплавами

Взаимодействие корпусов катамарана и поплавков представляет собой совокупность сложных гидродинамических процессов, обусловленных трансформацией волн, взаимодействием турбулентных потоков, поскольку движение катамарана и поплавок-бульба происходит при существенно разных числах Фруда и Рейнольдса.

Одним из способов решения задачи о взаимодействии корпусов катамарана и поплавок-бульба может быть использование известных решений для катамарана с соединительным мостом, имеющим несколько участков, соприкасающихся с водой [5-7].

В этом случае катамаран с поплавками можно рассматривать как комплекс из конечного числа тел n , полное сопротивление которых при движении вблизи свободной поверхности можно представить в виде:

$$R = \sum_{i=1}^n (R_{\tau_i} + R_{w_i}) + \Delta R_{\tau} + \Delta R_w, \tag{1}$$

где ΔR_{τ} и ΔR_w - соответственно дополнительное вязкостное и дополнительно волновое сопротивление, обусловленное взаимным влиянием тел;

$R_{\tau_i} + R_{w_i}$ - сумма вязкостного и волнового сопротивления воды движению каждого тела при их изолированном движении.

Дополнительное вязкостное сопротивление связано с изменением поля скоростей и давления вблизи тела, вызванных наличием других тел системы. Дополнительно волновое сопротивление возникает вследствие наложения волновых систем, индуцируемых каждым телом комплекса.

Известно, что интерференция волновых систем с разными фазами и длинами может приводить как к нарастанию, так и к уменьшению амплитуд результирующих волн, т.к. волновое сопротивление пропорционально амплитудам волн, вызванных при движении тел в жидкости. Длины волн, создаваемых отдельными телами комплекса, движущимися с одинаковой скоростью в однородном направлении, одинаковы.

Так длина поперечных волн:

$$\lambda_n = \frac{2\pi v_0^2}{g}, \tag{2}$$

длина расходящихся:

$$\lambda_p = \frac{2\pi v_0^2 \sin^2 \alpha}{g}, \tag{3}$$

где v_0 – скорость судна, а $\alpha=38^{\circ}56'$ – удвоенный угол Кельвина (угол фронта расходящихся волн).

Формулы 1-3 показывают, что условия благоприятной или неблагоприятной интерференции определяются фазами волновых систем, индуцируемых каждым телом, которые зависят от взаимного положения и размеров тел системы по направлениям параллельному и перпендикулярному движению.

По линейной теории волн гидродинамическую силу для конечного числа n источников можно получить, складывая те же силы для каждого из источников. Необходимо учитывать, что каждый из источников находится в потенциальном потоке, создаваемом набегающим поступательным потоком и потоками всех остальных $(n-1)$ источников. Волновое сопротивление комплекса из 3-х источников (двух корпусов катамарана и поплавок-бульба) в таком случае можно представить в виде суммы:

$$R_{\text{комп}} = 2R_{\text{к}} + \Delta R_{\text{кк}} + R_{\text{п}} + \Delta R_{\text{кп}}, \quad (4)$$

где $2R_{\text{к}}$ – удвоенное волновое сопротивление одного корпуса;
 $\Delta R_{\text{кк}}$ – волновое сопротивление, вызванное взаимодействием корпусов;
 $R_{\text{п}}$ – волновое сопротивление поплавка;
 $\Delta R_{\text{кп}}$ – волновое сопротивление, обусловленное взаимодействием корпусов и поплавка.

Воспользовавшись преобразования, полученными в работе [6], можно представить каждую составляющую волнового сопротивления в виде:

$$2R_{\text{к}} = -\frac{pg}{2\pi Fr^6} \frac{(LBT)^2}{L^3} \int_{\theta_0}^{\pi/2} \bar{J}_2^2 A_1 d\theta \quad (5)$$

$$\Delta R_{\text{кк}} = -\frac{pg}{2\pi Fr^6} \frac{(LBT)^2}{L^3} \int_{\theta_0}^{\pi/2} \bar{J}_2 A_1 \cos(\lambda_0 h \frac{\bar{b}}{h_L} \sin \theta) d\theta \quad (6)$$

$$R_{\text{п}} = -\frac{pg}{2\pi Fr^6} \frac{(L_{\text{п}} B_{\text{п}} T_{\text{п}})^2}{L^3} \int_{\theta_0}^{\pi/2} \bar{J}_{2\text{п}}^2 A_1 d\theta \quad (7)$$

$$\Delta R_{\text{кп}} = -\frac{pg}{\pi Fr^6} \frac{(L_{\text{п}} B_{\text{п}} T_{\text{п}})(LBT)}{L^3} \int_{\theta_0}^{\pi/2} \bar{J}_2 \bar{J}_{2\text{п}} A_1 \times \cos(\lambda_0 h \frac{\bar{b}}{h_L} \sin \theta) \cos(\lambda_0 h \frac{\bar{x}_m}{2h_L} \cos \theta) d\theta, \quad (8)$$

где L, B, T – длина, ширина и осадка корпуса судна;
 $L_{\text{п}}, B_{\text{п}}, T_{\text{п}}$ – длина, ширина и погружение поплавка-бульба;
 x_m – абсцисса середины поплавка;
 \bar{J}_2 и $\bar{J}_{2\text{п}}$ – интегралы волнового сопротивления катамарана и поплавка соответственно.

Формулы 7 и 8 позволяют вычислить дополнительное волновое сопротивление поплавка в зависимости от его положения по длине судна, погружения, длины и поперечного размера.

Сложность при расчетах $R_{\text{комп}}$ представляет вычисление площади смоченной поверхности, для чего, например, могут быть использованы аналитические выражения, полученные в работе [7]:

$$\bar{y} = (1 - \bar{x}^n)(1 \pm \bar{z}^m) \quad (9)$$

Вычисляя \bar{J}_2 получим:

$$\bar{J}_2 = -\left\{ \frac{2 \sin a}{a} \left[\frac{n(n-1)}{a^2} - \frac{n(n-1)(n-2)(n-3)}{a^4} + \frac{n(n-1)(n-2)(n-3)(n-4)(n-5)}{a^6} - \dots \right] - \right. \\ \left. - 2 \cos a \left[\frac{n}{a^2} - \frac{n(n-1)(n-2)}{a^4} + \frac{n(n-1)(n-2)(n-3)(n-4)}{a^6} - \dots \right] \right\} \times \left\{ \frac{1}{c} + e^{-c} \left[\frac{m}{c^2} + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{m(m-1)}{c^3} + \frac{m(m-1)(m-2)}{c^4} + \frac{m(m-1)(m-2)(m-3)}{c^5} + \dots \frac{m(m-1)(m-2)\dots}{c^{m+1}} \right] - \right. \\ \left. \frac{m(m-1)(m-2)\dots}{c^{m+1}} \right\} \quad (10)$$

Здесь:

$$a = \frac{1}{2Fr^2 \cos \theta} \quad (11)$$

$$c = \frac{\frac{T}{L}}{Fr^2 \cos^2 \theta} \quad (12)$$

Уравнение смоченной поверхности поплавка может быть также описано формулой (9), в котором величины a и c вычисляются по формулам 13 и 14:

$$a = \frac{1}{2Fr_M^2 \cos \theta} \quad (13)$$

$$c = \frac{\frac{T_M}{L_M}}{Fr_M^2 \cos^2 \theta} \quad (14)$$

Формулы 4-14 позволяют проводить систематические расчеты волнового сопротивления катамарана с учетом влияния поплавка.

Результаты анализа работ [5-7] показывают, что существуют области чисел Фруда и размерений катамарана и поплавка, в которых происходит некоторое снижение волнового сопротивления всего комплекса $\bar{R}_m < 1$. При таком благоприятном положении поплавка по длине судна составляющая волнового сопротивления, вызванная взаимодействием корпусов и поплавка, вычитается из волнового сопротивления судна, а по абсолютной величине больше, чем собственное волновое сопротивление поплавка при его изолированном движении в жидкости.

При увеличении размеров, в частности длины поплавка, возрастает его собственное волновое сопротивление, которое растет пропорционально квадрату длины, а составляющая гидродинамического взаимодействия $\Delta R_{км}$ – пропорциональна длине в первой степени, что позволяет предположить существование оптимальной длины поплавка-бульба.

Несмотря на то, что основные размерения поплавка-бульба могут быть определены по приведенным выше формулам, вычисление площади смоченной поверхности остается сложной задачей, которая может быть решена с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD) в специализированных программных продуктах (AnsysFluent, StarCCM, FlowVision, NUMECA/FineMarine). Кроме того, точность расчетов может быть повышена за счет учета формы трехмерной волновой поверхности, что требует моделирования изолированного катамарана и поплавка, а также их взаимодействия.

Исследованию волнообразования большегрузных катамаранов для внутренних водных путей посвящено большое число работ [2, 8-10]. Особенностью таких катамаранов длиной 100-150 м является движение в докритическом режиме в диапазоне чисел Фруда от 0,2 до 0,3, который характеризуется существенными колебаниями величины как полного, так и остаточного сопротивления (до 40%), и изучен недостаточно. Кроме сопротивления, необходимо оценить параметры волн, генерируемых судном в междукорпусном пространстве и по наружному борту, а также характеристики волн, генерируемых поплавком-бульбом, для оценки возможности благоприятной их интерференции.

Результаты исследования гидродинамики подобного катамарана численными методами приведены в работе [8]. Моделирование выполнялось для трех вариантов длин катамаранов 112, 132 и 152 м и различных относительных клиренсов \bar{C} : 0,3; 0,35; 0,4; 0,44; 0,5; 0,56. Для всех случаев были получены не только значения сопротивления (рис. 4), но и трехмерные картины волновых процессов и двумерные профили (рис. 5) волновой поверхности на внутреннем и наружном корпусах катамаранов.

Совместный анализ работ [5-7] и [8] позволил выделить некоторые характерные особенности гидродинамики катамаранов при $Fr=0,275$ $Fr=0,3$ $Fr=0,38$.

При $Fr=0,275$ для катамарана $L=112$ м практически во всех случаях график $\zeta_{полн}$ имеет локальный минимум (рис. 4а).

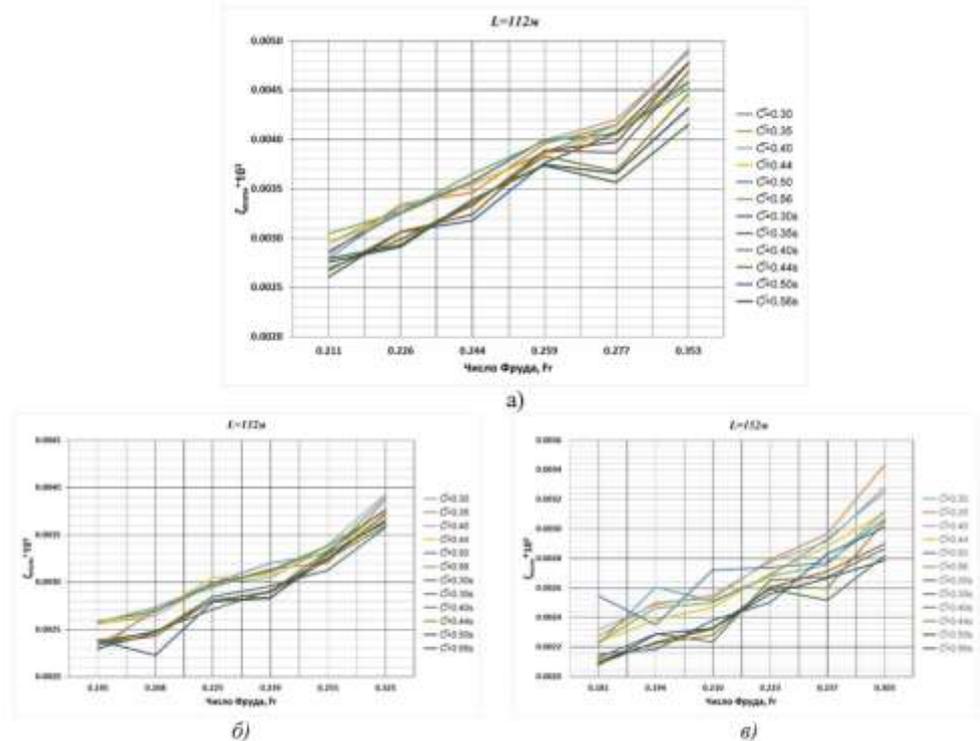


Рис. 4. Коэффициенты полного сопротивления для катамаранов различной длины
а) $L=112$ м; б) $L=132$ м; в) $L=152$ м

Для катамаранов длиной 132 и 152 м наблюдается максимальное (по отношению ко всем предыдущим Fr) значение $\zeta_{полн}$ и переход к «линейному» изменению $\zeta_{полн}$ после достижения очередного локального минимума (самый минимум для кривой $\bar{C} = 0,50$ (симметричный корпус) на рис. 4б, а на рис. 4а и в для $\bar{C} = 0,56$ (симметричный корпус). При $Fr=0,3$ для всех случаев наблюдается максимальное $\zeta_{полн}$ и переход к «линейному» изменению $\zeta_{полн}$ (на рис. 4б) и в самый минимум для кривой $\bar{C} = 0,50s$, а для рис. 4а $\bar{C} = 0,56s$).

У катамарана с симметричным корпусом $L=152$ м минимальные высоты волн наблюдаются при клиренсе $\bar{C} = 0,44$, максимальные $\bar{C} = 0,35$ (рис. 4в). Интенсивность повышения ординат волн происходит после значения числа Фруда 0,237. Профили волновой поверхности приведены на рис.5.

Размещение поплавков-бульбов таким образом, чтобы они вызывали благоприятную интерференцию волн в междукорпусном пространстве, могло бы привести к снижению волнового сопротивления катамарана, для чего необходимо выбрать не только главные размерения поплавков, но и подобрать их оптимальную форму.

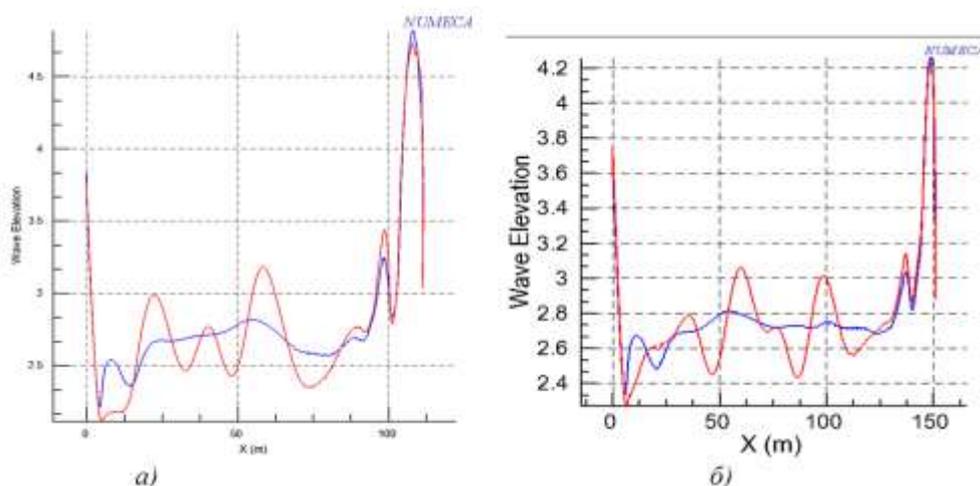


Рис. 5. Профили волновой поверхности по внутреннему (красная линия) и наружному (синяя линия) бортам катамарана при скорости 8,6 м/с: а) L=112м; б) L=152 м

2. Численное моделирование гидродинамики поплавков-бульбов простой формы

Для поиска наиболее подходящей формы поплавок-бульба было выполнено исследование [11] гидродинамики трех эллипсоидов диаметром 1,76 м и длиной: 29,2м

(Fr от 0,414 до 0,691), 14,6м (Fr от 0,585 до 0,978) и 7,3м (Fr от 0,827 до 1,383), а также шара диаметром D=1,76м (Fr от 1,685 до 2,816) с помощью численного моделирования при скоростях движения катамарана 7 – 11,7 м/с. Осадка была постоянной во всех случаях и составляла половину диаметра эллипсоида. Исследования проводились с помощью программного комплекса NUMECA/FineMarine™, параметры расчетной области и граничные условия выбирались в соответствии с рекомендациями [12,13]. Применялась неструктурированная расчетная сетка с локальным измельчением в области распространения волнового сектора. Учет трения обеспечивался разрешением пограничного слоя – 20-22 уровней при $y^+=1$. Пример построенной расчетной сетки приведен на рис. 6.

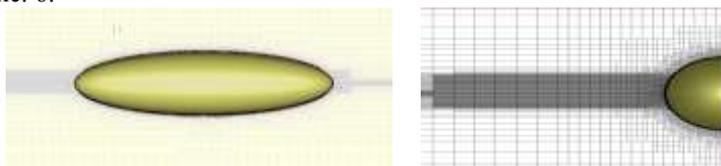


Рис. 6. Примеры построенной расчетной сетки для эллипсоида L=7,3 м

В результате моделирования были получены двумерные и трехмерные волновые профили (например, для скорости 9,17 м/с приведены на рис.7-10). Обобщённые результаты по высотам волн в зависимости от скорости приведены на рис. 11.

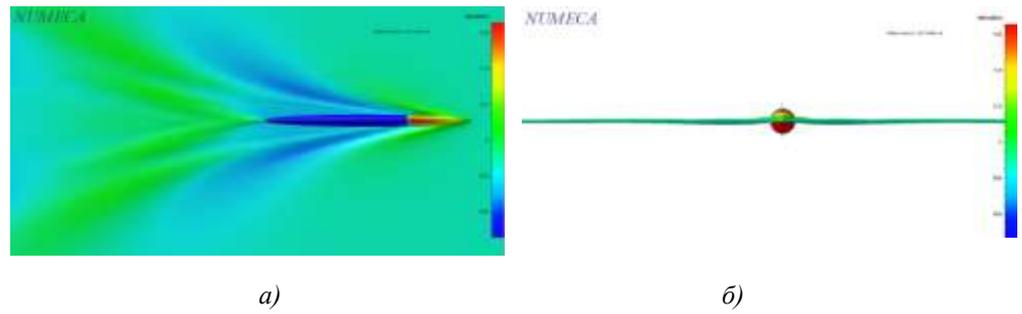


Рис. 7. Волновая поверхность эллипсоида длиной 29,2 м при $u=9,17$ м/с вид а) сверху; б) с носа.

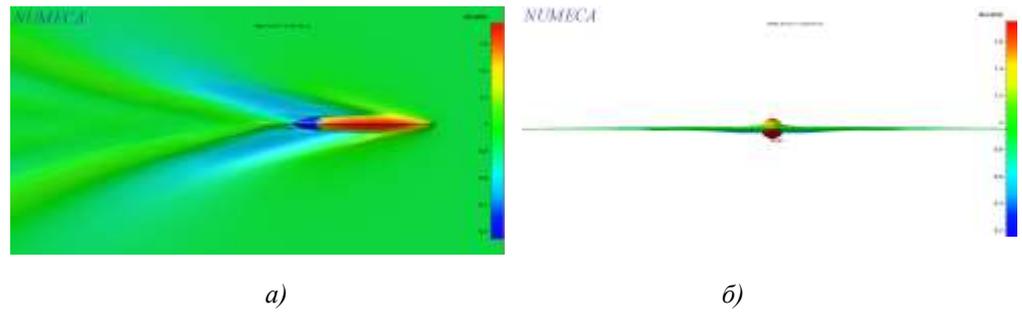


Рис. 8. Волновая поверхность эллипсоида длиной 14,6 м при $u=9,17$ м/с вид а) сверху; б) с носа.

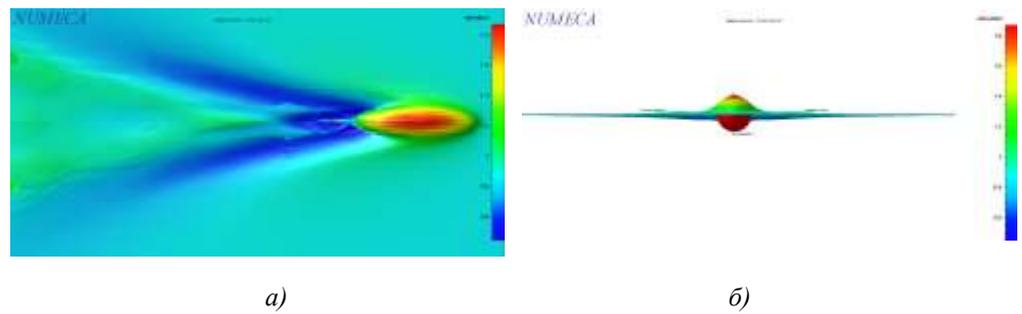


Рис. 9. Волновая поверхность эллипсоида длиной 7,2 м при $u=9,17$ м/с вид а) сверху; б) с носа.

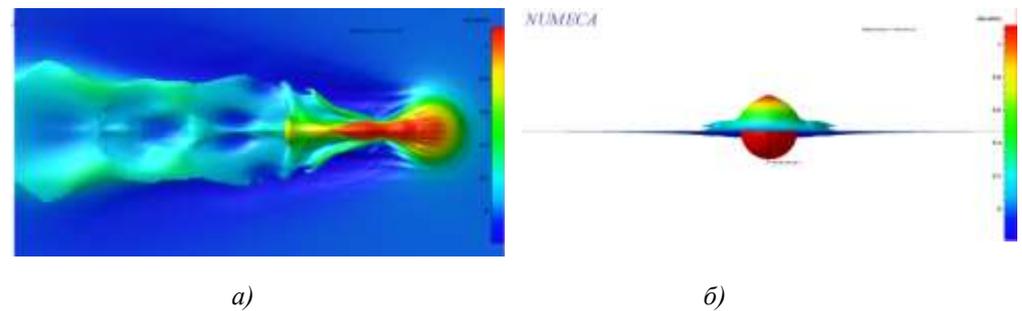
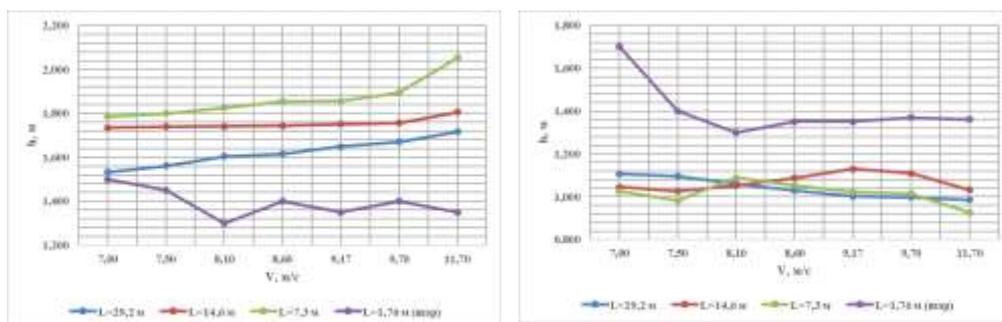


Рис. 10. Волновая поверхность шара при $u=9,17$ м/с вид а) сверху; б) с носа.



а)

б)

Рис. 11. Зависимости высоты волны от скорости движения тел а) в носу; б) в корме

Из рассмотрения рис.7а видно, что высоты волн в носу, образуемые при движении поплавков, для шара имеют наименьшие значения во всем исследуемом диапазоне скоростей, а в ряду трех эллипсоидов наименьшие высоты наблюдаются у эллипсоида длиной 29,2 метра. Графики, показанные на рис.7б, свидетельствует об обратной картине высот волн в корме тел, максимальные значения которых наблюдаются во всем диапазоне скоростей у шара, причем при начальной скорости 7 м/с высота волны наибольшая. Наименьшим средним значением обладает эллипсоид длиной 7,3 метра. Также стоит отметить, что при скорости 8,10 м/с значения высот волн для всех трех эллипсоидов практически одинаковые.

В то же время, при осадке $1/2D$, рассмотренной в работе А. Mandru и F. Pasaru [1], практически во всех случаях наблюдается «замывание» поверхности как эллипсоидов, так и шара, что влияет на форму волновой поверхности и соответственно на интерференцию волн. В результате высоты волн в носу для эллипсоидов длиной 29,2 и 14,6 м высоты носовых волн мало зависят от скорости, а для шара высоты волн вообще уменьшаются с ростом скорости. Кроме того, с учетом угла $\alpha=38^{\circ}56'$ и затухания волн, поплавки в форме эллипсоида необходимо выносить далеко в нос катамарана, что увеличит габаритные размерения судна и ухудшит его эксплуатационные характеристики. Это требует дополнительной проработки в части уточнения возможной осадки поплавков-эллипсоидов и рассмотрения других возможных форм.

3. Заключение

В настоящей статье выполнен обзор некоторых исследований, посвященных использованию бульба, установленного между корпусами катамарана, для снижения волнового сопротивления судна. Сделаны выводы о возможности создания благоприятной интерференции и снижении волнового сопротивления при использовании дополнительного поплавка-бульба. Рассмотрены особенности волнового сопротивления катамарана с дополнительными поплавками. Приведены расчетные формулы для оценки влияния на волновое сопротивление катамарана расположения поплавка по длине судна, а также соотношений размеров корпусов и поплавка.

Отмечена недостаточная изученность вопроса использования поплавков-бульбов для речных катамаранов длиной от 100 до 150 метров в диапазоне движения, соответствующем числам Фруда от 0,2 до 0,3, в котором коэффициент остаточного сопротивления изменяется в широких пределах (до 40%). Предполагается, что большая амплитуда колебаний коэффициента остаточного сопротивления в основном обусловлена изменениями распределения давлений и соответственно нестабильность высот и длин волн между корпусами катамарана.

Приведены результаты работ по численному моделированию движения речного катамарана и некоторых тел простой формы, которые могут быть использованы в качестве поплавков. Сделан вывод о возможности использования полученных волновых профилей, генерируемых телами различной формы, для определения параметров катамаранов и поплавков-бульбов, а также о необходимости дальнейших исследований волнообразования поплавков различной формы.

Список литературы

1. Mandru A., Pacuraru F. Experimental study on catamaran hydrodynamics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020. - Vol. 916. - P. 012060. (DOI: 10.1088/1757-899X/916/1/012060).
2. Чебан Е.Ю., Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Мартемьянова О.В., Никущенко Д.В., Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1. С 210-219. URL: http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1694073166mit3part12023.pdf?ysclid=lqw8zshb2e558013615 (дата обращения 15.12.2023)
3. Saha G.K., Suzuki K., Kai H. Hydrodynamic optimization of a catamaran hull with large bow and stern bulbs installed on the center plane of the catamaran // Marine Science and Technology. - 2005. - Vol. 10. - No. 1. - P. 32-40. (DOI: 10.1007/s00773-004-0186-6).
4. Danisman D.B. Numerical and experimental investigation of the effect of bow flare angle on the resistance and seakeeping performance of catamarans // Ocean Engineering. - 2014. - Vol. 91. - P. 227-234.
5. Малова С.В. Исследование влияния соединительного моста на волновое сопротивление катамарана: Дис. ... канд. техн. наук / С.В. Малова. – Горький, 1969. – 156 с.
6. Малова С.В. Отчет по научно-исследовательской работе (госбюджетной) Исследование волнового сопротивления катамаранных судов с мостом обтекаемого типа. / Малова С.В. – Горький, 1975. – 49 с.
7. Малова С.В. О расчете волнового сопротивления катамарана с соединительным мостом, входящим в воду // Труды ГИИВТа. 1972 Вып. 108, С. 58-69.
8. Чебан Е.Ю., Лукина Е.А., Митрошин С.Г., Мартемьянова О.В., Никущенко Д.В., Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 1. С 210-219. URL: http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1694073166mit3part12023.pdf?ysclid=lqw8zshb2e558013615 (дата обращения 15.12.2023)
9. Зотова, Н. Е. Оценка воолнообразования катамаранных и однокорпусных судов / Н. Е. Зотова, О. В. Мартемьянова, Е. Ю. Чебан // Проблемы экологии Волжского бассейна : Труды 5-й всероссийской научной конференции, Нижний Новгород, 24–25 ноября 2020 года. Том Выпуск 3. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2020. – С. 11. – EDN FTFOOV.
10. Оценка волнообразования большегрузного катамарана с различными формами внутреннего борта / Е. Ю. Чебан, О. В. Мартемьянова, С. Г. Митрошин [и др.] // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – № 63. – С. 109-120. – DOI 10.37890/jwt.vi63.82. – EDN AXBAQK.
11. 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://vf-река-море.рф/2023/3_15.pdf (дата обращения 19.12.2023).
12. User Manual FINETTM/Marine v7.1, Documentation v7.1a NUMECA International, 187-189, Chaussee de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
13. Garo R., Imas L. Hydrodynamic Performance of a Submerged Lifting Surface Operating at High Speed, [4th High Performance Yacht Design Conference], 2012.

References

1. Mandru A., Pacuraru F. Experimental study on catamaran hydrodynamics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020. - Vol. 916. - P. 012060. (DOI: 10.1088/1757-899X/916/1/012060).
2. Cheban E. Yu., Lukina E.A., Mitroshin S.G., Martemyanova O.V., Nikushchenko D.V., Investigation of wave formation of a heavy-duty catamaran for inland waterways by numerical methods // Marine intelligent technologies. 2023. No. 3 part 1. From 210-219. URL: http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1694073166mit3part12023.pdf?ysclid=lqw8zshb2e558013615 (accessed 12/15/2023).
3. Saha G.K., Suzuki K., Kai H. Hydrodynamic optimization of a catamaran hull with large bow and stern bulbs installed on the center plane of the catamaran // Marine Science and Technology. - 2005. - Vol. 10. - No. 1. - P. 32-40. (DOI: 10.1007/s00773-004-0186-6).
4. Danisman D.B. Numerical and experimental investigation of the effect of bow flare angle on the resistance and seakeeping performance of catamarans // Ocean Engineering. - 2014. - Vol. 91. - P. 227-234.
5. Malova S.V. Investigation of the effect of a connecting bridge on the wave resistance of a catamaran: Dis. ... candidate of Technical Sciences / S.V. Malova. – Gorky, 1969. – 156 p.
6. Malova S.V. Report on scientific research (state budget) Study of wave resistance of catamaran vessels with a streamlined bridge. / Malova S.V. – Gorky, 1975. – 49 p.
7. Malova S.V. On the calculation of wave resistance of a catamaran with a connecting bridge entering the water. 1972 Ed. 108, pp. 58-69.
8. Cheban E.Yu., Lukina E.A., Mitroshin S.G., Martemyanova O.V., Nikushchenko D.V., Study of wave formation of a heavy-duty catamaran for inland waterways using numerical methods // Marine intelligent technologies. 2023. No. 3 part 1. From 210-219. URL: http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1694073166mit3part12023.pdf?ysclid=lqw8zshb2e558013615 (accessed 12/15/2023)
9. Zotova, N. E. Assessment of wave formation of catamaran and single-hull ships / N. E. Zotova, O. V. Martemyanova, E. Yu. Cheban // Problems of ecology of the Volga basin: Proceedings of the 5th All-Russian Scientific Conference, Nizhny Novgorod, 24– November 25, 2020. Volume Issue 3. – Nizhny Novgorod: Volga State University of Water Transport, 2020. – P. 11. – EDN FTFOOV.
10. Assessment of wave formation of a heavy-duty catamaran with different shapes of the inner side / E. Yu. Cheban, O. V. Martemyanova, S. G. Mitroshin [etc.] // Scientific problems of water transport. – 2020. – No. 63. – P. 109-120. – DOI 10.37890/jwt.vi63.82. – EDN AXBAQK.
11. Cheban E.Yu., Kozhevnikov A.I., Bushkov S.V. Features of wave formation of some bodies of simple shape at large froude numbers.//Transport. Horizons of development. 2023: Proceedings of the International Scientific and Practical Forum. FGBOU VO "VGUVT". – 2023. – URL: http://вф-река-море .RF/2023/3_15.pdf (accessed 12.19.2023).
12. User Manual FINE™/Marine v7.1, Documentation v3.1a NUMECA International, 187-189, Chaussee de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
13. Garo R., Imas L. Hydrodynamic Performance of a Submerged Lifting Surface Operating at High Speed, [4th High Performance Yacht Design Conference], 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чебан Егор Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», 603905, Нижний Новгород, Нестерова, 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Egor Yu. Cheban, doctor of Technical Sciences, Professor, professor of Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environment Safety of Ships Volga State University of Water Transport, 603905, Nizhny Novgorod, Nesterova 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Кожевников Артур Игоревич, аспирант кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: nkolonget@ro.ru

Artur I. Kozhevnikov, postgraduate student Hydrodynamics, ship theory and ship's ecological safety department, Volga State University of Water Transport 603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5, e-mail: nkolonget@ro.ru

Статья поступила в редакцию 24.01.2023; опубликована онлайн 20.03.2024.
Received 24.01.2023; published online 20.03.2024