

УДК 532.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ ПОПЛАВКОВ-БУЛЬБОВ БОЛЬШЕГРУЗНОГО КАТАМАРАНА

**Чебан Егор Юрьевич**<sup>1</sup>, доцент, доктор технических наук, профессор

*e-mail:* [egor.cheban.2@gmail.com](mailto:egor.cheban.2@gmail.com)

**Кожевников Артур Игоревич**<sup>1</sup>, аспирант

*e-mail:* [nkolonget@ro.ru](mailto:nkolonget@ro.ru)

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** Важную роль в волновом сопротивлении комплекса движущихся тел, в том числе большегрузного катамарана, играет сопротивление, возникающее в результате взаимодействия волновых систем каждого из тел, вследствие чего волновое сопротивление системы может быть и больше, и меньше суммы волновых сопротивлений каждого тела при изолированном движении. Одним из способов снижения волнового сопротивления и уменьшения высот волн между корпусами катамаранов является использование поплавок-бульбов, расположенных в диаметральной плоскости между корпусами, которые по сравнению с профилированными мостами (поплавками) могут выходить за нос или корму, а также быть полностью погружены в воду, обеспечивая тем самым постоянное взаимодействие с водой. Волнообразование самого бульба можно рассматривать как фундаментальную задачу движения тела вдоль твердых стенок в жидкости бесконечной глубины. В настоящей работе на основе кинематической математической модели приведены результаты расчетов оптимальной длины и ширины поплавок-бульба при его различных расположениях по длине корпуса, движущегося на тихой воде бесконечной глубины большегрузного катамарана ( $F_r$  от 0,181 до 0,303). Приведены результаты сравнения численного моделирования движения в жидкости эллипсоида длиной 7,3 м ( $F_r$  от 0,827 до 1,383) в неограниченном и ограниченном твердыми стенками потоках воды. Получены зависимости высот волн от скоростей движения, показывающие существенное увеличение высот волн для поплавок-бульба, движущегося в ограниченном пространстве.

**Ключевые слова:** волновое сопротивление, катамараны, волнообразование в канале, бульб, интегралы волнового сопротивления, поплавки соединительных мостов, вычислительная гидродинамика, твердые стенки, неограниченный поток.

## INVESTIGATION OF WAVE FORMATION OF BULBOUS FLOATS OF A HEAVY-DUTY CATAMARAN

**Cheban Egor Yurievich**<sup>1</sup>, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor

*e-mail:* [egor.cheban.2@gmail.com](mailto:egor.cheban.2@gmail.com)

**Kozhevnikov Artur Igorevich**<sup>1</sup>, postgraduate student

*e-mail:* [nkolonget@ro.ru](mailto:nkolonget@ro.ru)

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** An important role in the wave resistance of a complex of moving bodies, including a heavy-duty catamaran, is played by the resistance that arises as a result of the interaction of the wave systems of each of the bodies, as a result of which the wave resistance of the system can be both greater and less than the sum of the wave resistances of each body in isolated motion. One of the ways to reduce wave resistance and reduce wave heights between the hulls of catamarans is to use floats-bulbs located in the center plane between the hulls, which, in comparison with profiled bridges (floats), can extend beyond the bow or stern, and can also be completely submerged in water, thereby ensuring constant interaction with water. The wave formation of the bulb itself can be considered as a fundamental problem of the movement of a body along solid walls in a liquid of infinite depth. In this paper, based on a kinematic mathematical model, the results of calculations of the optimal length and width of the float-bulb for its various locations along the length of the hull moving on calm water of infinite depth of a heavy-duty catamaran ( $Fr$  from 0.181 to 0.303) are presented. The results of a comparison of numerical simulations of the motion of an ellipsoid 7.3 m long in a fluid are presented ( $Fr$  from 0.827 to 1.383) in unlimited and limited by solid walls water flows. Dependences of wave heights on movement speeds were obtained, showing a significant increase in wave heights for a bulb float moving in a limited space.

**Keywords:** wave resistance, catamarans, wave formation in a channel, bulb, wave resistance integrals, connecting bridge floats, computational fluid dynamics, solid walls, unlimited flow.

Большегрузные катамараны являются перспективным транспортом для повышения скорости перемещения грузов на внутренних водных путях. Несмотря на то, что высота корабельных волн, генерируемых такими катамаранами, меньше, чем у однокорпусных судов [1] при той же скорости, высоты волн, а, следовательно, и волновое сопротивление, все равно остаются значительными. Как показывают исследования [2] изменение параметров волн может быть достигнуто и за счет волнообразования поплавок-бульбов, размещенных в междукорпусном пространстве катамарана. Гидродинамическую систему, включающую в себя взаимодействующие поплавок-бульбы и корпуса катамаранов, можно рассматривать как комплекс из конечного числа тел, причем дополнительное волновое сопротивление будет возникать вследствие наложения волновых систем, индуцируемых каждым телом.

Волновое сопротивление двух одинаковых тел, расположенных симметрично некоторой плоскости и движущихся параллельно ей, можно получить используя известные выражения для волнового сопротивления одного такого тела в присутствии твердой стенки. Такое выражение было получено в 1949 г. J.K. Lunde в работе [3], и представляет собой сумму собственного волнового сопротивления судна и дополнительного волнового сопротивления, вызванного влиянием стенки. В работе [4] приведена формула расчета волнового сопротивления для системы тел на основе способа М.Г. Крейна, в котором гидродинамическая сила воздействия жидкости на тело и момент этой силы выражаются через плотность источников, распределенных по поверхности тела и ту часть потенциала скорости, которая является гармонической функцией во всем пространстве, занятом жидкостью, включая и объем тела. В соответствии с [5], для аналитического решения задачи о взаимодействующих силах, движущиеся в жидкости тела заменяются в соответствии с теорией Лунде системами гидродинамических особенностей, определяемых по методу М.Г. Крейна. На основе этих методов в работе [6] получены выражения, позволяющие проводить систематические расчеты влияния относительного удаления корпусов, положения взаимодействующего с водой поплавок по длине судна, соотношения размеров корпусов и поплавок на волновое сопротивление катамарана в жидкости бесконечно глубины. Здесь же отмечено, что благоприятная интерференция



будет происходить при значениях относительного волнового сопротивления  $R_{mm}$  (равного отношению общего волнового сопротивления катамарана с учетом поплавок-бульба к его собственному, без учета поплавок-бульба) меньше 1. Применимость данных выражений для исследований волнообразования бульбов большегрузных катамаранов описана в работе [7].

### Расчет относительного волнового сопротивления большегрузного катамарана с различными поплавками-бульбами

Используя модифицированные выражения, приведенные в работе [6], были получены графики зависимости величины относительного волнового сопротивления  $R_{mm}$  от длины поплавок-бульба  $L_m$  для двух вариантов различных положений по длине корпуса большегрузного катамарана с параметрами  $L=152$  м,  $B=9$  м,  $T=2,8$  м,  $b=10$  м (длина, ширина одного корпуса, осадка и клиренс соответственно) при различных скоростях  $V$  от 7 м/с до 11,7 м/с. Примеры таких зависимостей приведены на Рисунке 1.

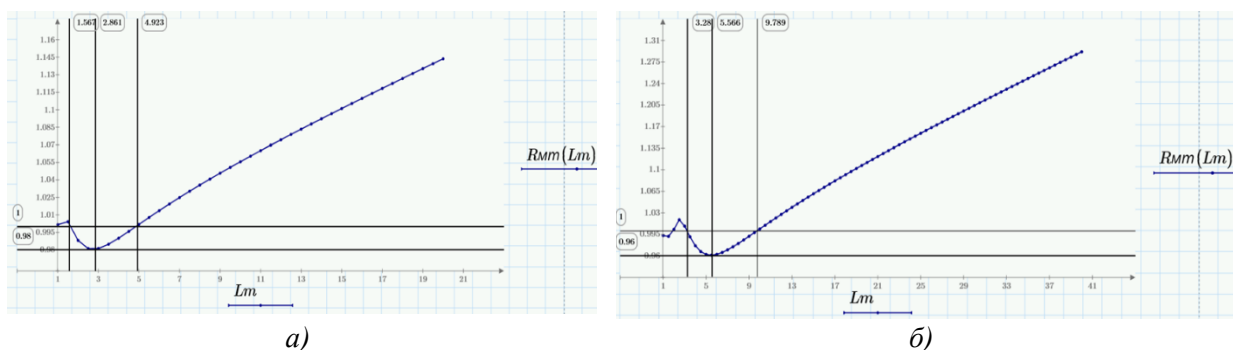


Рисунок 1 – Зависимость относительного волнового сопротивления  $R_{mm}$  при  $V=11,7$  м/с от длины поплавок-бульба  $L_m$  с шириной 3 м и погружением 1,5 м при размещении центра поплавок-бульба на расстоянии от плоскости мидель-шпангоута; а) 38 метров в нос б) 0 метров

На основе полученных зависимостей для каждого значения  $V$  из диапазонов  $L_m$ , при которых снижается волновое сопротивление ( $R_{mm}<1$ ), были выбраны самые оптимальные значения длин и соответствующие им значения  $R_{mm}$ , на основе чего был построен график на Рисунке 2. Также установлено, что существует диапазон длин  $L_m$ , при котором значения  $R_{mm}<1$  во всем рассматриваемом диапазоне скоростей.

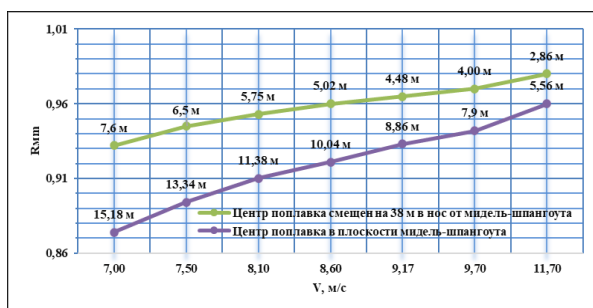


Рисунок 2 – Зависимость  $R_{mm}$  от скорости для самых оптимальных  $L_m$  (длин поплавок-бульба) при постоянной ширине 3 м и погружении 1,5 м

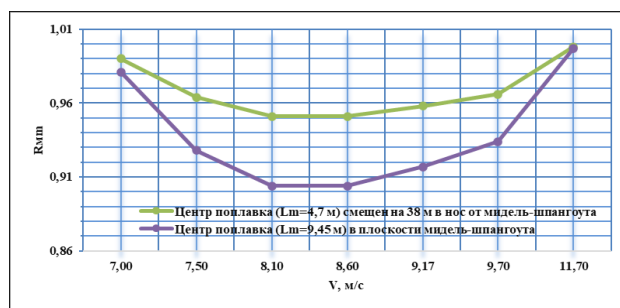


Рисунок 3 – Зависимость  $R_{mm}$  от скорости для поплавок-бульба с шириной 3 м, погружением 1,5 м и рассчитанными оптимальными  $L_m$

При размещении центра поплавок-бульба в плоскости мидель-шпангоута данный диапазон варьируется от 4,47 м до 4,92 м, а при размещении на расстоянии 38 метров в нос от плоскости мидель-шпангоута от 9,097 м до 9,789 м. Для средних значений  $L_m$  этих

диапазонов были построены зависимости  $R_{\text{шт}}$  от ширины поплавок-бульба  $B_m$ , приведенные на Рисунке 3.

По результатам анализа всех полученных данных были сделаны выводы, что с увеличением скорости движения:

- уменьшаются оптимальная длина поплавок-бульба, которая могла бы уменьшить волновое сопротивление, и диапазон длин  $L_m$  при которых возможно благоприятное гидродинамическое воздействие;

- увеличивается величина  $R_{\text{шт}}$ , что в свою очередь приводит к ухудшению воздействия поплавок-бульба;

- при постоянной ширине наблюдается нелинейная зависимость  $R_{\text{шт}}$  от  $V$ .

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

### Численное моделирование гидродинамики эллипсоида движущегося вдоль твердых стенок

Процесс волнообразования поплавок-бульба, размещенного в междукорпусном пространстве катамарана, можно рассмотреть как решение фундаментальной задачи движения тела определенной формы вдоль твердых стенок (в канале). Численное моделирование данного процесса проводилось с помощью программного комплекса NUMECA/FineMarine™. В качестве исследуемого тела выступал погруженный в воду на 0,88 м эллипсоид длиной 7,3 метра и шириной 1,76 м, движущийся в диапазоне скоростей соответствующий числам Фруда от 0,827 до 1,383. Расстояние между твердыми стенками и длина расчетной области равнялись клиренсу 10 м и длине 152 м большегрузного катамарана соответственно.

Полученные результаты сравнивались с данными работы [8], в которой проводились аналогичные исследования движения эллипсоидов в неограниченном потоке жидкости бесконечной глубины. Пример сравнения результатов приведен на Рисунке 4.

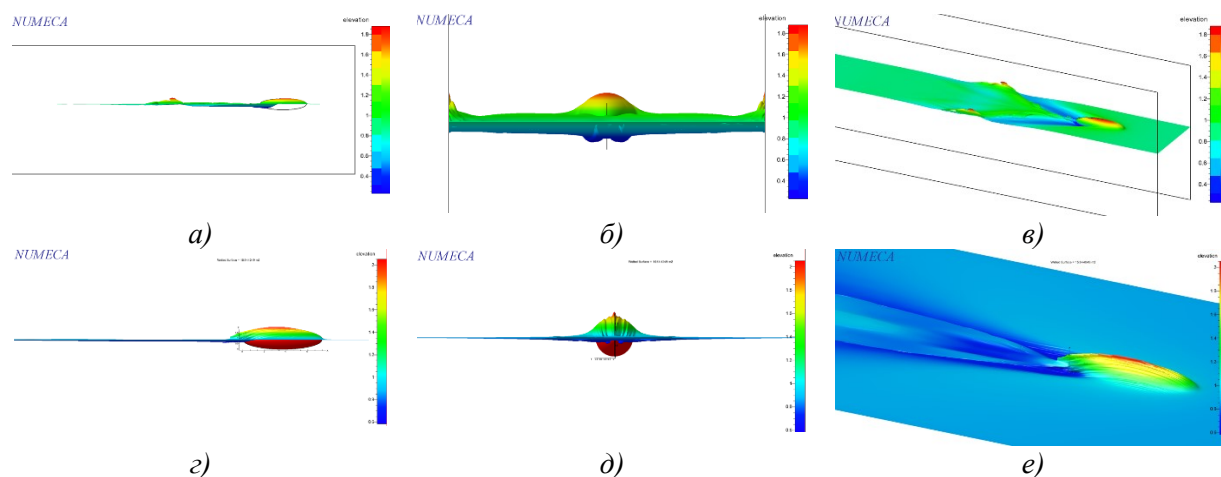


Рисунок 4 – Волновая поверхность при движении эллипсоида с  $V=7$  м/с в потоке жидкости: а, б, в – ограниченном твердыми стенками; г, д, е – неограниченном

Наблюдаемые изменения в картинах волнообразования связаны с интерференцией волн при отражении их от стенок, однако, как показали результаты моделирования, существует конечное расстояние, при котором данные возмущения стремятся к нулю. Из Рисунка 5 видно, что сопротивление эллипсоида в обоих случаях отличаются мало, однако, максимальная высота волн комового буруна в ограниченном стенками потоке выше. Также необходимо отметить, что график на Рисунке 6 зависимости изменения высот волн для данного случая носит нелинейный характер и имеет локальный минимум при  $V=7,5$  м/с, что требует дополнительного исследования и будет продолжено в дальнейшем.

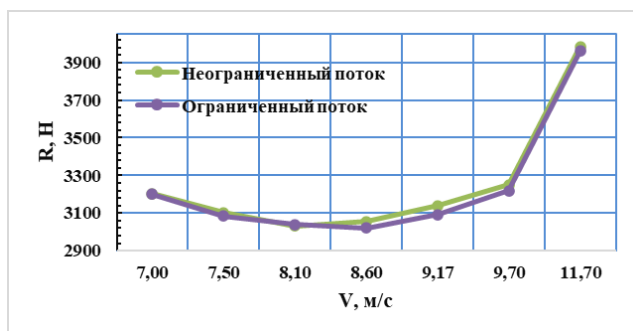


Рисунок 5 – Зависимости величины сопротивления от скорости движения эллипсоида

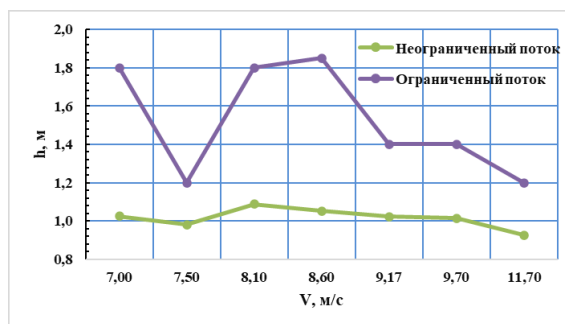


Рисунок 6 – Зависимости максимальной высоты волны за кормой от скорости движения тела

### Заключение

В настоящей работе с помощью аналитической модели кинематики жидкости выполнены расчеты относительного волнового сопротивления гидродинамического комплекса, состоящего из корпусов большегрузного катамарана (длина 152 м, клиренс 9 м, ширина 1 корпуса 10 метров, осадка 2,8 м) и поплавок-бульба (при различных значениях длины от 1 м до 40 м с шагом 1 м, и ширины от 0,1 м до 5 м с шагом 0,1 м), установленного в междукорпусном пространстве (для двух случаев размещения центра самого поплавок-бульба: в плоскости мидель-шпангоута и на расстоянии 38 м в нос от нее). В результате расчета получены данные об оптимальных размерах поплавок для исследуемого диапазона скоростей движения катамарана. При размещении центра поплавок-бульба в плоскости мидель-шпангоута данный диапазон по длине варьируется от 4,47 м до 4,92 м, а при размещении на расстоянии 38 метров в нос от плоскости мидель-шпангоута от 9,097 м до 9,789 м, ширина и погружение составляют 3 м и 1,5 м соответственно. Также установлено, что с увеличением скорости движения уменьшаются оптимальная длина поплавок-бульба, которая могла бы уменьшить волновое сопротивление, и диапазон длин  $L_m$  при которых возможно благоприятное гидродинамическое воздействие; увеличивается величина  $R_{шт}$ , что в свою очередь приводит к ухудшению воздействия поплавок-бульба; при постоянной ширине наблюдается нелинейная зависимость  $R_{шт}$  от  $V$ .

Приведены результаты численного моделирования движения тела эллипсоидной формы в ограниченном твердыми стенками потоке жидкости и выполнено сравнение с результатами его движения в безграничной жидкости. Получено, что высоты генерируемых корабельных волн выше в случае движения эллипсоида в ограниченном пространстве за счет их отражения от стенок, а общая тенденция изменения высот волн имеет схожую картину для обоих случаев. При скорости 7,5 м/с высота волны принимает значение локального минимума, причем наиболее ярко это выражено при движении в ограниченном потоке. Данный факт может быть дополнительно исследован для установления причин

такой зависимости. Величина сопротивления незначительно отличается в большую сторону для диапазона скоростей от 8,6 м/с до 9,7 м/с при движении в неограниченном потоке.

#### **Список литературы:**

1. Оценка волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей / И.К. Кузьмичев, Е.А. Лукина, С.Г. Митрошин, Е.Ю. Чебан // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 4-3 (38). – С. 99 – 105. – EDN YPLAKC.
2. Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами / Е.Ю. Чебан, Е.А. Лукина, С.Г. Митрошин [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 3-1(61). – С. 210 – 219. – DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.021. – EDN PERDQG.
3. J.K. Lunde The Linearized Theory of Wave Resistance and Its Application to Ship-Shaped Bodies in Motion on the Surface of a Deep, Previously Undisturbed Fluid // Technical and Research Bulletin №. 1-18. – URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aca5fc970-295c-4f2c-8dbf-985c3fe0f9ad> (дата обращения 15.04.2024).
4. Взаимодействие тел, движущихся в жидкости / А.А. Костюков. – Ленинград: Судостроение, 1972 г. – 301 с.
5. Транспортные катамараны внутреннего плавания. / М.Я. Алферьев., Г.С. Мадорский. – М.: Транспорт, 1976 г. – 336 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. Чебан, Е.Ю., & Кожевников, А.И. (2024). Исследование волнообразования поплавок для использования в качестве бульбов большегрузных катамаранов// Е.Ю. Чебан, А.И. Кожевников// Научные проблемы водного транспорта. – 2024. – № 78. – С. 84-96. – URL: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi78.456> (дата обращения 15.04.2024).
8. 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.рф/2023/PDF/3\\_15.pdf](http://вф-река-море.рф/2023/PDF/3_15.pdf) (дата обращения 15.04.2024).

