



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 531.391.1 + 532.5.011
EDN GIZBFY

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВОЛН ПРИ ДВИЖЕНИИ НЕКОТОРЫХ ТЕЛ ПРОСТОЙ ФОРМЫ В СВОБОДНОМ ПОТОКЕ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Е.Ю. Чебан, д-р техн. наук, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950 Россия, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

А.И. Кожевников, аспирант, Волжский государственный университет водного транспорта, 603950 Россия, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: nkolonget@ro.ru

Д.В. Никущенко, д-р техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: dmitry@nikushchenko.ru

В статье рассматриваются особенности волнообразования при движении со скоростями от 7 м/с до 11,7 м/с тел различной формы: шара, эллипсоида, модифицированного тела Вигли и продольного цилиндра с обтекателями с $L/B = 1, 2, 4, 6, 8, 16$ при изменении осадок от 0,465 м до 0,865 м. Представлены результаты численного моделирования с помощью программного комплекса NUMECA/FineMarineTM. Приведены зависимости коэффициентов полного сопротивления и высот генерируемых волн от чисел Фруда. Показано влияние основных размеров и формы тел на коэффициент полного сопротивления и генерируемых высот волн, а также нелинейность процесса волнообразования при изменении размеров тел и осадок. Полученные результаты будут использованы для исследований в области снижения волнового сопротивления большегрузного катамарана за счет интерференции волновых систем, создаваемых его корпусами и устанавливаемым в междукорпусном пространстве дополнительным телом, образующим с судном единый гидродинамический комплекс.

Ключевые слова: волнообразование, вычислительная гидродинамика, волновое сопротивление, эллипсоид, движение тел в неограниченном потоке, тело Вигли, большегрузный катамаран, корабельные волны.

Для цитирования: Чебан Е.Ю. Оценка параметров волн при движении некоторых тел простой формы в свободном потоке численными методами / Е.Ю. Чебан, А.И. Кожевников, Д.В. Никущенко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 39 — 51. — EDN GIZBFY.

A STUDY OF SOME SIMPLE-SHAPE BODIES WAVE GENERATION DURING MOTION IN THE UNRESTRICTED FLOW

E.Yu. Cheban, DSc, Volga State University of Water Transport, 603950 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Nesterova, 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

A.I. Kozhevnikov, PhD student, Volga State University of Water Transport, 603950 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Nesterova, 5, e-mail: nkolonget@ro.ru

D.V. Nikushchenko, DSc, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: dmitry@nikushchenko.ru

The article considers the features of wave formation during movement at speeds from 7 m/s to 11.7 m/s of bodies of various shapes: a sphere, an ellipsoid, a modified Wigley hull and a longitudinal cylinder with fairings with $L/B = 1, 2, 4, 6, 8, 16$ and a range of draft from 0.465 m to 0.865 m. The results of numerical modeling using the NUMECA/FineMarineTM software package are presented. The dependences of the coefficients of total resistance and heights of generated waves on the Froude numbers are presented. The influence of the main dimensions and shape of bodies on the coefficient of total resistance and generated wave heights is shown,

as well as the nonlinearity of the wave formation process when changing the dimensions of bodies and drafts. The results obtained will be used for research in the field of reducing the wave resistance of a heavy-duty catamaran due to the interference of wave systems created by its hulls and an additional body installed in the interhull space, forming a general hydrodynamic complex with the vessel.

Key words: *ship's wave, computational fluid dynamics (CFD), wave resistance, ellipsoid, unlimited flow, Wigley hull, large-cargo catamarans, wave interference, wave height.*

For citation: Cheban E.Yu., Kozhevnikov A.I., Nikushchenko D.V. A study of some simple-shape bodies wave generation during motion in the unrestricted flow. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 39 — 51. EDN GIZBFY. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей повышения скорости перевозок грузов в прибрежной морской зоне и на внутренних водных путях является использование накатных судов смешанного плавания катамаранного типа грузоподъемностью более 5000 т.

Гидродинамическое взаимодействие корпусов судов катамаранного типа приводит к изменению вызванных скоростей их обтекания, что существенно сказывается на структуре волнообразования и волновом сопротивлении. Процесс волнового взаимодействия зависит от числа Фруда и взаимного расположения корпусов. При этом может наблюдаться как значительный рост, так и снижение волнового сопротивления по сравнению с суммарным волновым сопротивлением изолированных корпусов, что обусловлено процессами трансформации волн в междукорпусном пространстве.

Снижение высот волн в междукорпусном пространстве может быть достигнуто за счет размещения там дополнительного тела (или тел), входящего в единый гидродинамический комплекс вместе с корпусами катамарана (рис. 1). Итоговая интерференционная волновая картина для такого комплекса будет напрямую зависеть от положения, осадки, размеров и формы используемого тела. Оптимизация этих параметров может позволить существенно снизить волновое сопротивление. Данный тезис подтверждается, например, работой [1] А. Mandru и F. Pasuragu, посвященной улучшению гидродинамических характеристик катамарана путем установки тела эллиптической формы между корпусами. Эксперименты проводились в опытовом бассейне с моделью в масштабе 1:32 в диапазоне чисел Фруда от 0,1 до 0,8 для трех различных глубин и двух положений вдоль корпуса (нос и корма), с центром тела в диаметральной плоскости судна. По результатам исследований было установлено, что в диапазоне чисел Фруда 0,4 — 0,6 полученные значения коэффициентов сопротивления для всех вариантов размещения тела меньше, чем в случае без его использования.

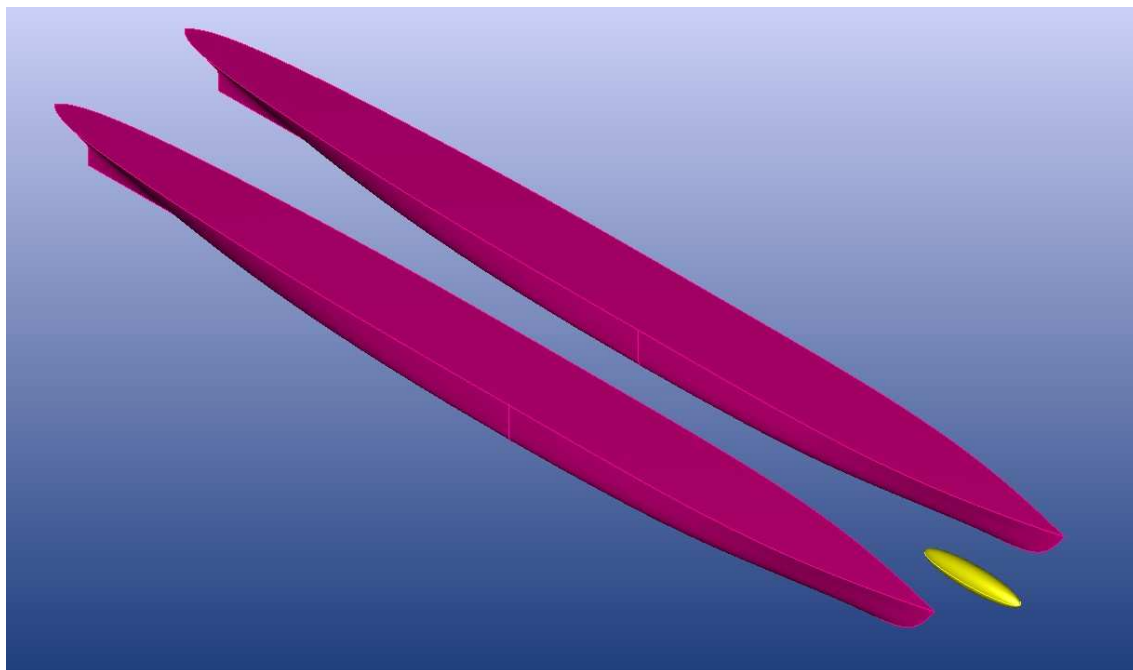


Рис. 1. Твердотельная геометрия катамарана с поплавком-бульбом

Ряд работ посвящен схожим исследованиям, проведенным с использованием численных методов. Так, G.K. Saha, K. Suzuki и H. Kai в статье [2] привели результаты расчетов, согласно которым корпус катамарана с установленным в междукорпусном пространстве телом при $Fr=0,45$ позволил снизить волновое сопротивление более чем на 65 %, а при $Fr=0,5$ — на 50 % по отношению к первоначальному значению для корпуса катамарана без тела. В работе [3] D.B. Danisman с применением искусственной нейронной сети провел аналогичные исследования, подтвержденные впоследствии экспериментом, в результате которых было отмечено снижение волнового сопротивления на 15 % для числа Фруда 0,6.

Приведенные результаты исследований не охватывают диапазоны скоростей, характерных для большегрузных речных катамаранов, основная скорость движения которых соответствует диапазону чисел Фруда от 0,181 до 0,303. В решении задачи снижения волнового сопротивления такого типа судов могут помочь результаты волновых картин тел различных форм, планируемых к установке в междукорпусном пространстве. В виду меньших размеров, чем корпуса судна, значения чисел Фруда для некоторых таких тел соответствуют значениям критических скоростей или даже превышают их.

Среди исследований волнового сопротивления простых тел в первую очередь необходимо выделить теоретические работы Т.Н. Havelock [4, 5], в которых волновое сопротивление сферы и эллипсоида определялось с помощью интеграла Мичелла. Волновое сопротивление эллипсоида и сферы с учетом мелководья теоретически исследовалось М. Kinoshita и Т. Inui [6]. В статье [7] исследовались двумерные тела с целью определения минимального сопротивления для диапазона чисел Рейнольдса от 20 до 105, что позволило оценить влияние ламинарно-турбулентного перехода.

В работе G.P. Benham и др. [8] на основе экспериментов в опытовом бассейне исследовано влияние асимметрии тел на их волновое сопротивление. В этой же работе представлен модифицированный интеграл Мичелла, позволяющий учесть влияние пограничного слоя. Показано, что асимметрия может иметь как положительное, так и отрицательное влияние на сопротивление в зависимости от глубины потока и числа Фруда.

Однако приведенные работы в большей степени посвящены исследованию сопротивления тел с целью его минимизации и не дают информации о параметрах образующихся при их движении волн, которая необходима для оценки возможности их использования в качестве поплавков-бульбов катамаранов. Кроме того, диапазоны чисел Фруда не отвечают скоростям движения большегрузных катамаранов.

С другой стороны, появление дополнительного элемента корпуса катамарана повлечет за собой введение требований к его конструкции, размещению и т.д., регулируемых классификационными обществами, в том числе Российским морским регистром судоходства [9]. Для разработки подобных требований необходимы данные о гидродинамических характеристиках поплавков-бульбов, в том числе параметры генерируемых ими волн.

Таким образом, целью настоящей работы является оценка зависимости параметров корабельных волн от скорости движения и размеров тел простой формы в безграничном потоке.

Представленные результаты исследований являются продолжением работы [10].

1. ОБЩИЙ ПОДХОД К ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ ПРОСТЫХ ТЕЛ

Численное моделирование с использованием коммерческих программных продуктов позволяет существенно сэкономить время и ресурсы, при этом гибкость и удобство задания параметров позволяет быстрее проанализировать полученные результаты. В настоящей работе для исследования волнообразования при движении тел простой формы на глубокой воде в свободном потоке использовался программный комплекс NUMECA/FineMarineTM, результаты решения которого хорошо согласуются с экспериментальными данными [11, 12].

Исследования проводились при различных осадках для четырех типов форм тел, симметричных относительно диаметральной плоскости (рис. 2): шара, эллипсоида, модифицированного тела Вигли, отраженного относительно палубы, а также цилиндрического тела с обтекателями.

Варьируемые в ходе моделирования размерения исследуемых тел и скорости их движения представлены в табл. 1. Параметры тел выбирались с учетом дальнейшей возможности их использования для снижения волнового сопротивления большегрузного катамарана [13].

Необходимо отметить, что движение поплавков-бульбов происходит при повышенных по сравнению с катамараном числах Фруда и Рейнольдса (табл. 2 и 3), что приводит к сложным гидродинамическим явлениям, которые необходимо учитывать при построении сетки, задании размеров расчетной области и граничных условий.

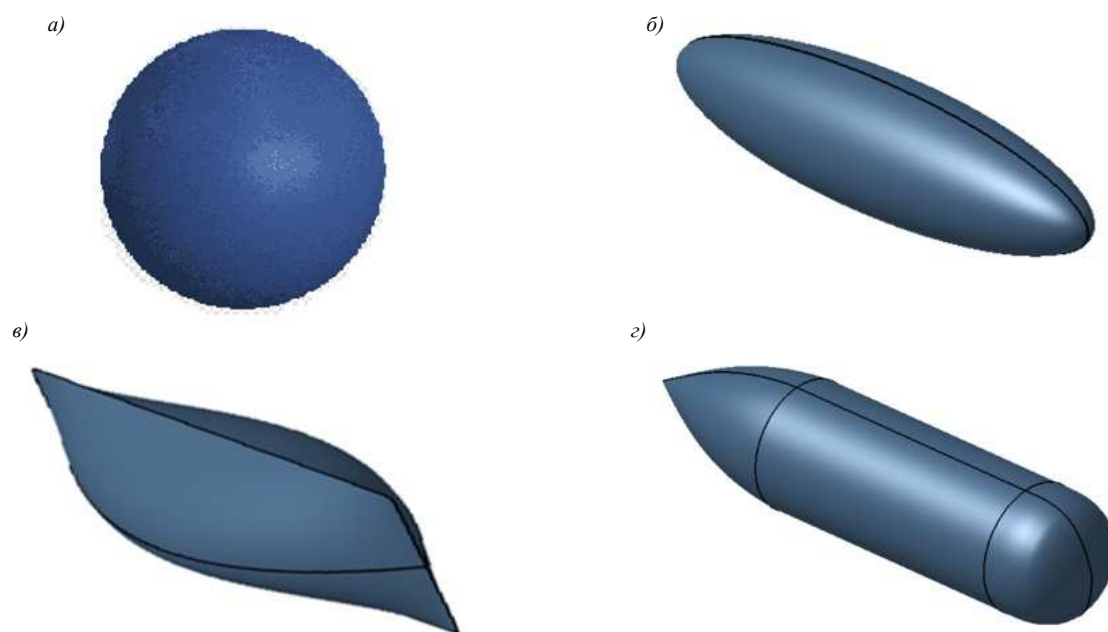


Рис. 2. Твёрдотельная геометрия исследуемых форм тел:
 а — шар; б — эллипсоид; в — модифицированное тело Вигли; г — цилиндр с обтекателями

Таблица 1

Основные размеры исследуемых тел и их скорости движения

Форма	L	L/B	B/T	Скорость, v , (м/с)
Шар	1,73	1	2	
Эллипсоид Модифицированное тело Вигли Цилиндр с обтекателями	3,64; 7,30; 14,60; 29,20	2; 4; 8; 16	3,72; 3,06; 2,60; 2,26; 2,00	

Таблица 2

Числа Фруда при движении тел

Длина, L , м	Скорость, м/с						
	7,0	7,5	8,1	8,6	9,17	9,7	11,7
1,73	1,70	1,82	1,97	2,09	2,23	2,35	2,84
3,64	1,17	1,26	1,36	1,44	1,53	1,62	1,96
7,3	0,83	0,89	0,96	1,02	1,08	1,15	1,38
14,6	0,58	0,63	0,68	0,72	0,77	0,81	0,98
29,2	0,41	0,44	0,48	0,51	0,54	0,57	0,69

Таблица 3

Числа Рейнольдса при движении тел

Длина, L , м	Скорость, м/с						
	7,0	7,5	8,1	8,6	9,17	9,7	11,7
1,73	$7,99 \cdot 10^6$	$8,56 \cdot 10^6$	$9,25 \cdot 10^6$	$9,82 \cdot 10^6$	$10,47 \cdot 10^6$	$11,08 \cdot 10^6$	$13,36 \cdot 10^6$
3,64	$16,82 \cdot 10^6$	$18,02 \cdot 10^6$	$19,46 \cdot 10^6$	$20,66 \cdot 10^6$	$22,03 \cdot 10^6$	$23,31 \cdot 10^6$	$28,11 \cdot 10^6$
7,30	$33,73 \cdot 10^6$	$36,14 \cdot 10^6$	$39,03 \cdot 10^6$	$41,44 \cdot 10^6$	$44,19 \cdot 10^6$	$46,74 \cdot 10^6$	$56,38 \cdot 10^6$
14,60	$67,46 \cdot 10^6$	$72,28 \cdot 10^6$	$78,06 \cdot 10^6$	$82,88 \cdot 10^6$	$88,37 \cdot 10^6$	$93,48 \cdot 10^6$	$112,75 \cdot 10^6$
29,20	$134,92 \cdot 10^6$	$144,55 \cdot 10^6$	$156,12 \cdot 10^6$	$165,76 \cdot 10^6$	$176,74 \cdot 10^6$	$186,96 \cdot 10^6$	$225,50 \cdot 10^6$

Размеры расчетной области и граничные условия выбирались в соответствии с рекомендациями [14 — 16]. В виду симметричности исследуемых тел для уменьшения затрат времени моделировалась только половина тела, рассеченного по диаметральной плоскости с граничным условием «симметрия» (равенство нулю нормальных и касательных составляющих скорости). Ширина расчетной области выбиралась исходя из ранее выполненных исследований [12, 13] с учетом отсутствия трансформации волн на стенках расчетной области и составила $2L_{OA}$ (L_{OA} — длина тела между перпендикулярами). Выполнялось моделирование для глубокой воды, в связи с чем не учитывалось взаимодействие тела и дна водоема, поэтому глубина расчетной области составила $1,5L_{OA}$.

Расположение граничных условий на гранях расчетной области приведено на рис. 3 и в табл. 4.

При моделировании использовалась неструктурированная расчетная сетка, построенная в подпрограмме HEXPRESSTM, с адаптацией по свободной поверхности жидкости и поверхности тела. Параметры сетки определялись по результатам исследования сеточной сходимости.

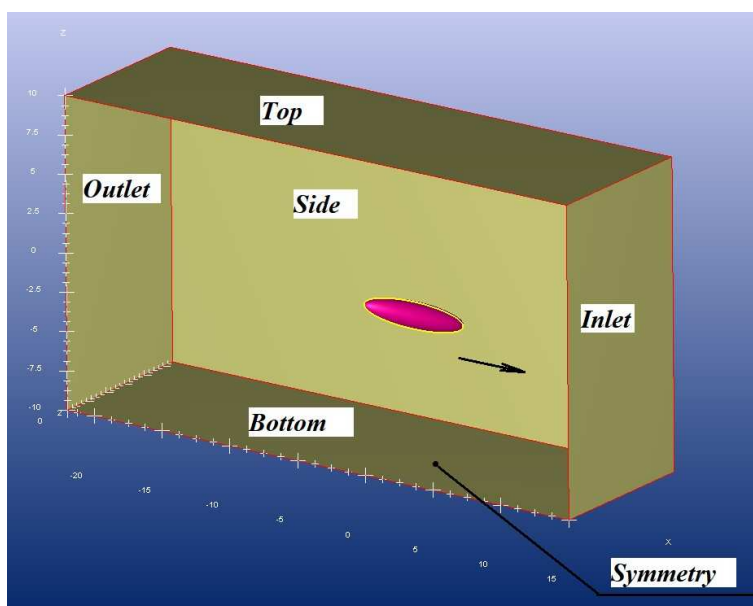


Рис. 3. Общий вид расчетной области

Таблица 4

Граничные условия на гранях расчетной области

Грани	Тип граничного условия
Верх и дно (Top and bottom)	"Prescribed pressure" > "Updated hydrostatic pressure"
Выход-вход-боковая грань (Outlet, Side, Inlet)	"Far field" (velocity components equal to zero)
Плоскость симметрии (Mirror)	"Mirror" (symmetry)
Корпус катера	all solids — "Wall function"

В статье [17] показано, что при повышении числа Фруда угол расхождения волн существенно уменьшается, что было учтено в области изменения волновой поверхности с помощью дополнительного измельчения сетки вблизи тела в форме сектора. Примеры общего вида сетки приведены на рис. 4, а ее параметры — в табл. 5.

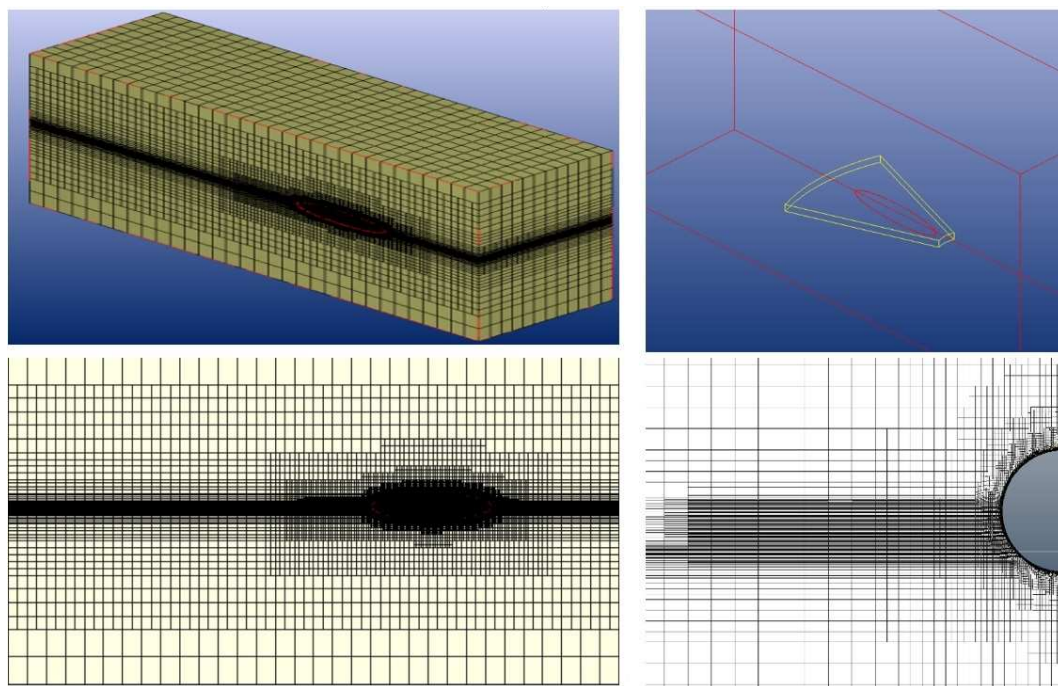


Рис. 4. Пример общего вида расчетной сетки

Таблица 5

Параметры расчетной сетки

Форма тела	Размеры начальной области сетки, м (количество ячеек, шт.)	Адаптация геометрии корпуса	Высота первой ячейки пограничного слоя при $y^+ = 70$ (м)
Шар	32×12×12 (4608)	6	0,000273323
Эллипсоид:			
7,30 м	32×12×12 (4608)	6	0,000258228
14,60 м	32×12×8 (3072)	7	0,000395679
29,20 м	38×12×10 (4560)	7	0,000188729
Модифицированное тело Вигли:			
3,64 м	32×12×12 (4608)	6	0,000236882
7,30 м	32×12×12 (4608)	6	0,000258322
14,60 м	32×12×12 (4608)	7	0,000395424
29,20 м	32×12×12 (4608)	7	0,000679766
Цилиндр с обтекате- лями:			
3,64 м	32×12×12 (4608)	7	0,000283323
7,30 м	30×12×12 (4320)	7	0,000310056
14,60 м	30×12×12 (4320)	6	0,000338118
29,20 м	20×12×12 (2880)	6	0,000368721

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе численного моделирования в общей сложности было выполнено и обработано около 200 вычислительных экспериментов, а также построено более 50 зависимостей с целью создания базы данных по гидродинамическим характеристикам и генерируемым волнам от тел различной формы. Часть материалов, заслуживающих обсуждения, приведена ниже. Так, на рис. 5 приведены зависимости коэффициента полного сопротивления тел от числа Фруда при одинаковой осадке 0,865 м.

Стоит отметить, что модифицированное тело Вигли ввиду меньшей площади смоченной поверхности обладает наименьшим значением коэффициента сопротивления практически во всем диапазоне чисел Фруда и при всех длинах, за исключением $L/B=4$ (14,6 м) (рис. 5в), при которой данные значения имеют наибольшую величину по отношению к остальным телам.

На рис. 6 приведены зависимости коэффициента сопротивления от числа Фруда для модифицированного тела Вигли и эллипсоида длиной 14,6 м и 7,3 м во всем диапазоне исследуемых осадок.

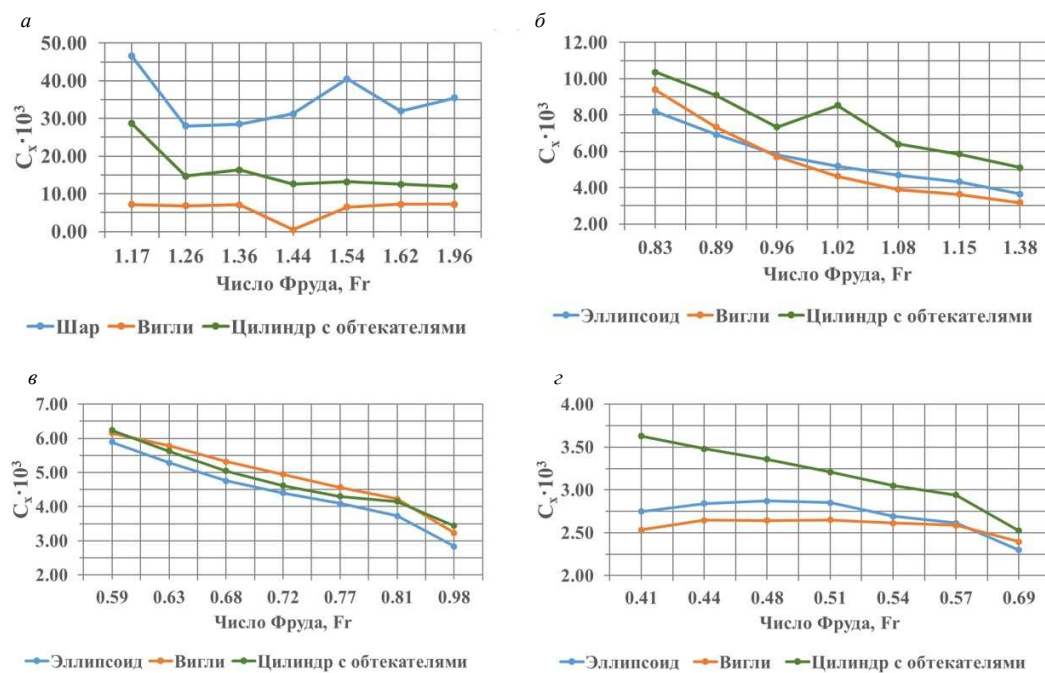


Рис. 5. Коэффициенты сопротивления тел при осадке 0,865 м различной длины:
а — 3,64 м, б — 7,3, в — 14,6, г — 29,2 м

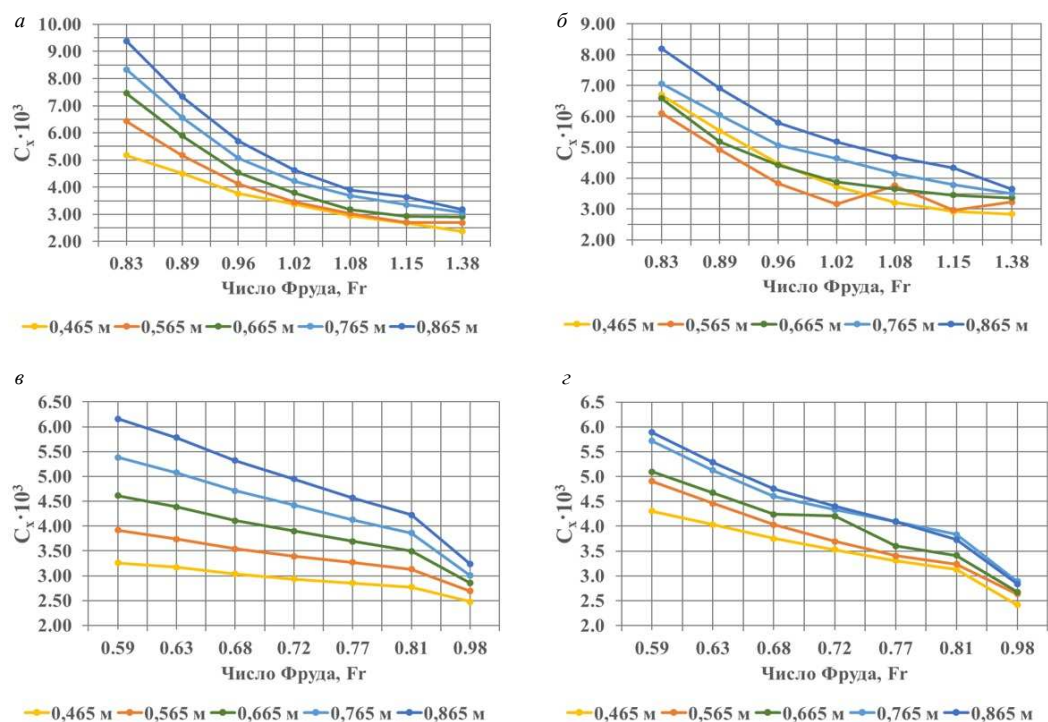


Рис. 6. Коэффициенты сопротивления при различных осадках для тел различной формы и длины:
а — модифицированное тело Вигли $L = 7,3$ м; б — эллипсоид $L = 7,3$ м;
в — модифицированное тело Вигли $L = 14,6$ м; г — эллипсоид $L = 14,6$ м

Наблюдается общая тенденция увеличения коэффициентов полного сопротивления с увеличением погружения тела, за исключением эллипсоида длиной 7,3 м. Для данного тела наименьшее значение коэффициента полного сопротивления достигается при осадке 0,565 м, однако при скоростях, соответствующих числам Фруда 1,08 и 1,38, сопротивление остается высоким.

На рис. 7 приведены значения высот волн в корме и носу для тел различных форм и длины при одинаковой осадке 0,865 м.

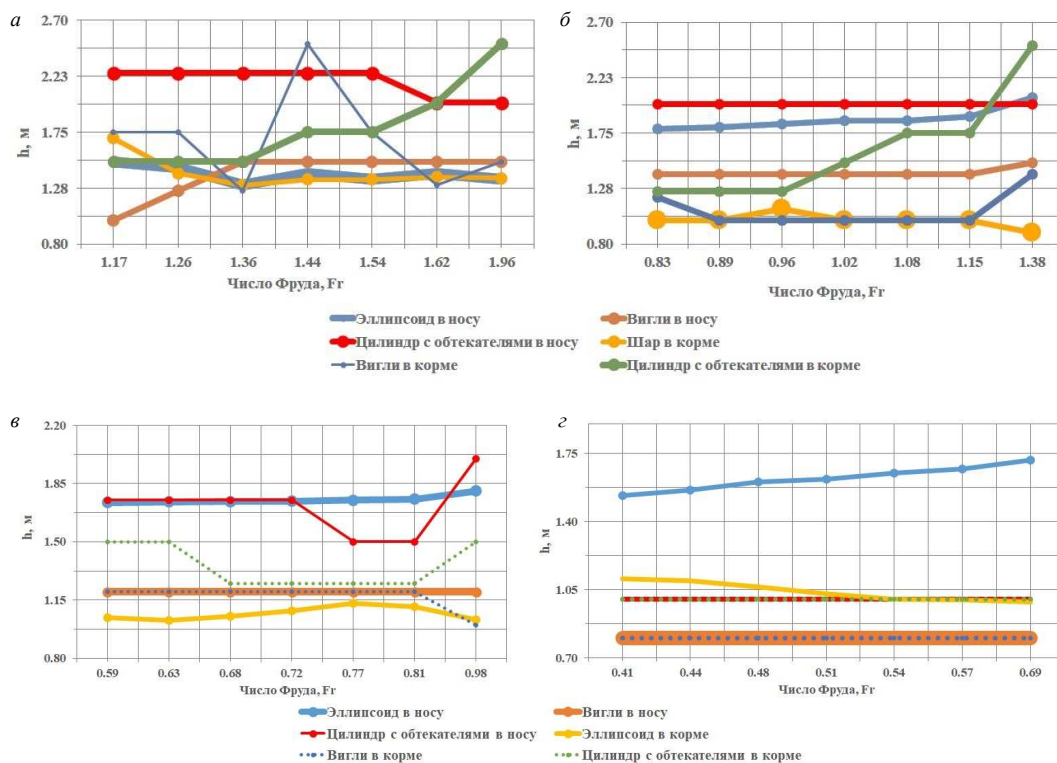


Рис. 7. Высоты волн при осадке 0,865 м для тел различной формы и длины:
а — 3,64 м, б — 7,3, в — 14,6, г — 29,2 м

Из рассмотрения графиков на рис. 7 видно, что самые высокие волны в основном генерируются цилиндром с обтекателями при всех длинах, за исключением $L/B = 16$ (29,2 м). Для модифицированного тела Вигли и цилиндра с обтекателями длиной 3,64 м при числах Фруда 1,44 и 1,96 соответственно наблюдается резкий скачок высоты волны в корме, превышающий по величине высоты волн, генерируемых другими телами. Однако для тела формы Вигли высоты волн в носу имеют среднее значение. Цилиндр с обтекателями генерирует волну такой же высоты при длине 7,3 м и числе Фруда 1,38.

Анализ зависимостей на рис. 8 позволяет установить, что наибольшие высоты волн в носу генерируются эллипсоидом при осадке $T=0,865$ м во всем исследуемом диапазоне чисел Фруда. Модифицированное тело Вигли, в свою очередь, при $L=14,6$ м является источником волн такого же размера при осадке 0,765 м, причем при осадке 0,865 м высоты волн имеют постоянное значение. Максимальные высоты волн наблюдаются у эллипсоида.

На рис. 9 — 11 приведены волновые поверхности при движении различных тел. Совместный анализ рис. 9 и рис. 5б показывает более сильные возмущения в кормовой части у тела формы цилиндра с обтекателями, а также заливание водой, по сравнению с остальными телами, что способствует увеличению площади смоченной поверхности, волнового сопротивления и, соответственно, самого коэффициента полного сопротивления. Протяженность волнового следа при этом короче у цилиндра с обтекателями рис. 9а.

Рис. 10 позволяет наблюдать динамику изменения волновой поверхности при движении эллипсоида и тела Вигли с $L=7,3$ м в зависимости от их погружения. Высоты генерируемых волн при погружении эллипсоида на 0,565 м выше, чем при 0,465 м, что приводит к увеличению волнового сопротивления и, как следствие, коэффициента полного сопротивления, что и видно на графиках рис. 6б.

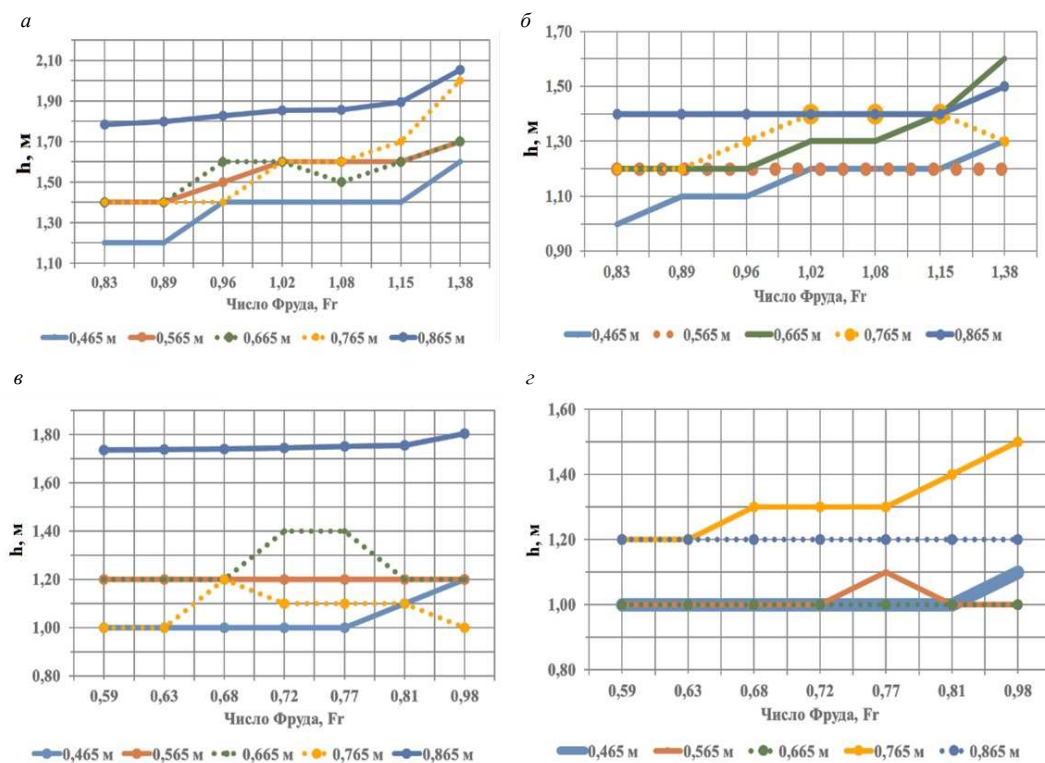


Рис. 8. Высоты волн в носу для тел различной формы и длины:
 а — эллипсоид $L=7,3$ м; б — модифицированное тело Вигли $L=7,3$ м;
 в — эллипсоид $L=14,6$ м; з — модифицированное тело Вигли $L=14,6$ м

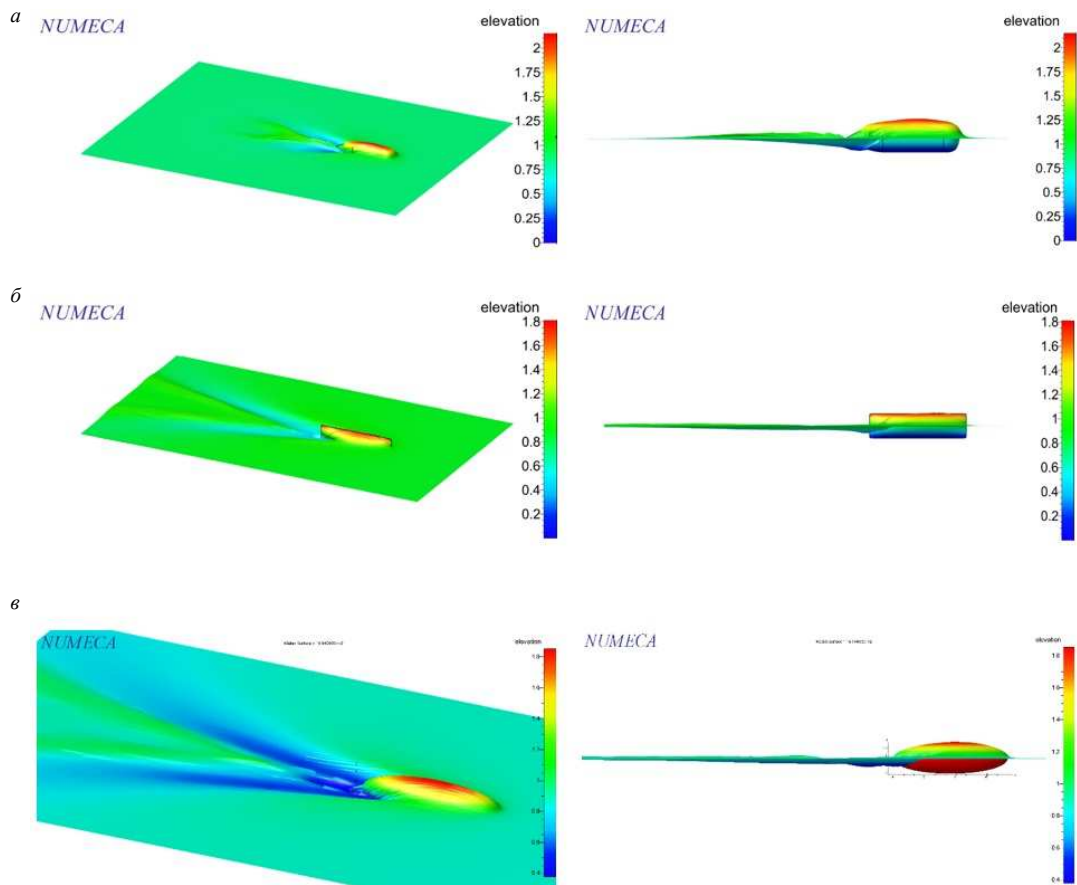


Рис. 9. Волновая поверхность при движении различных тел длиной 7,3 м со скоростью 8,6 м/с ($Fr=1,02$):
 а — цилиндр с обтекателями; б — модифицированное тело Вигли; в — эллипсоид

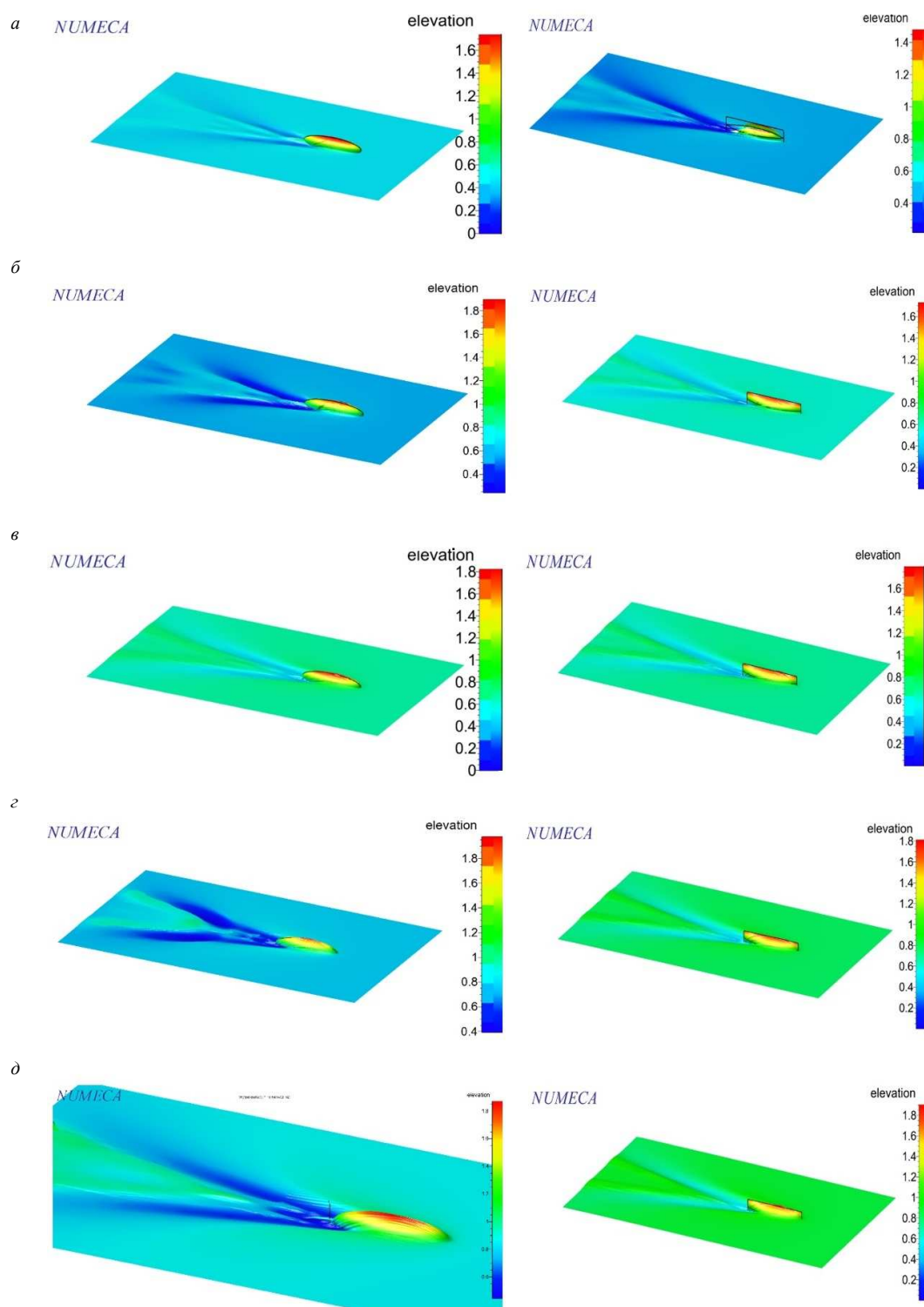


Рис. 10. Волновая поверхность тел (слева эллипсоид, справа модифицированное тело Вигли) с одинаковой длиной 7,3 м и скоростью движения 9,17 м/с ($Fr=1,08$) при различных осадках: а — 0,465 м, б — 0,565, в — 0,665, г — 0,765, д — 0,865 м

На рис. 11 представлена волновая поверхность при движении тел различной формы со скоростью 8,6 м/с (соответствует большому числу $Fr=1,44$) и осадке 0,865 м. Для модифицированного тела Вигли наблюдается максимально высокая величина высоты волны в корме и впадина по отношению к другим телам. Сравнительный анализ высот волн, генерируемых такими телами, приведен на рис. 7а. Однако коэффициент сопротивления у тела Вигли имеет наименьшую величину (рис. 5а).

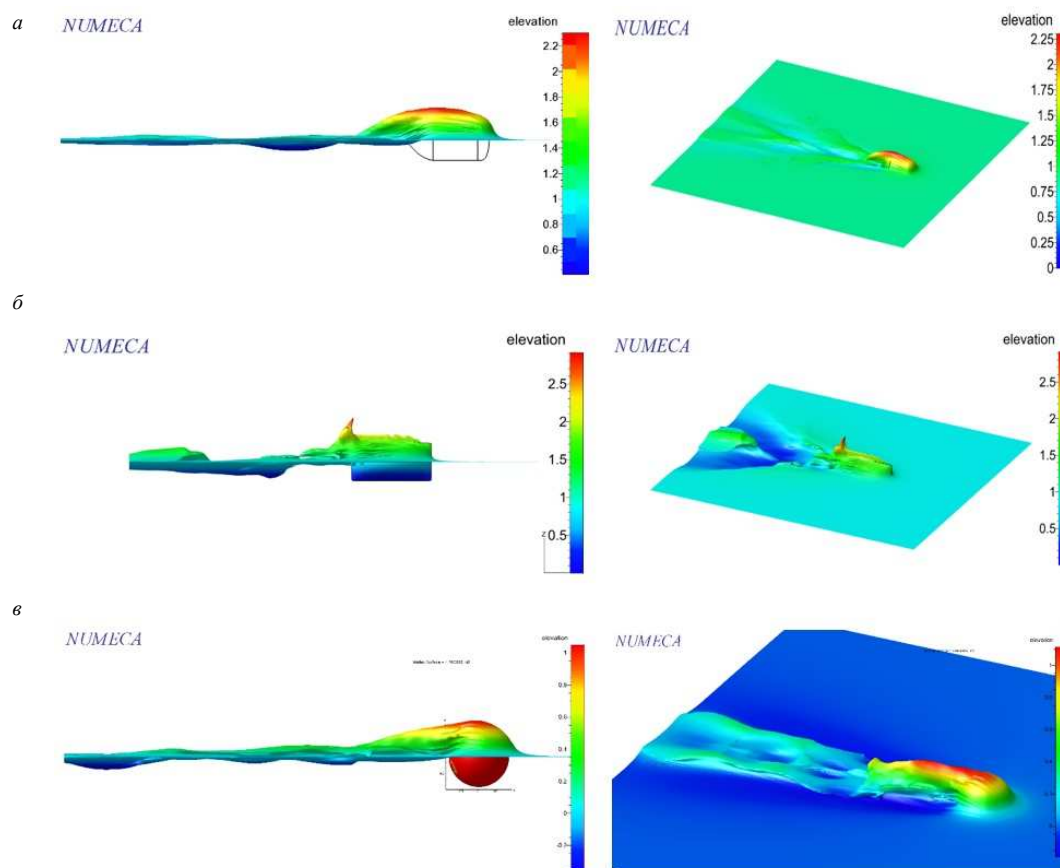


Рис. 11. Волновая поверхность тел различной формы с одинаковой длиной 3,64 м, скоростью движения 8,6 м/с ($Fr=1,44$) и осадке 0,865 м:
 а — цилиндр с обтекателями; б — модифицированное тело Вигли; в — шар

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлены результаты численного моделирования волнообразования простых тел эллипсоида, модифицированного (отраженного по палубе) тела Вигли, шара и цилиндра с обтекателями с помощью программного комплекса NUMECA/FineMarineTM. В ходе вычислительных экспериментов изменялись длины тел, их осадки и скорости движения от 7 м/с до 11,7 м/с. Получены зависимости коэффициентов полного сопротивления и высот генерируемых волн от чисел Фруда. Показано влияние главных размерений и формы тел на коэффициент полного сопротивления и параметры генерируемых волн, а также нелинейность процесса волнообразования при изменении размеров или осадки.

Выявлено, что в диапазоне скоростей от 7 м/с до 11,7 м/с при осадке 0,865 м наименьшим коэффициентом волнового сопротивления при длине тел 3,64 м обладает тело формы Вигли, а при 14,6 м — эллипсоидной формы. При длинах 7,3 м и 29,2 м наименьшее среднее значение данного коэффициента достигается телом формы Вигли. Установлено, что для тела Вигли и эллипсоида для длин 7,3 м и 14,6 м с ростом погружения увеличивается величина коэффициента полного сопротивления, однако для эллипсоида данная средняя величина при погружении 0,565 м меньше, чем при 0,465 м. Выявлено, что максимальные высоты волн, равные 2,4 м, достигаются в корме при погружении 0,865 м тел формы Вигли с длиной 3,64 м и цилиндра с обтекателями с длинами 3,64 м и 7,3 м. Показана нелинейность генерируемых волн телами различных форм и размеров, что, в свою очередь, подтверждает необходимость модификации тел — не только главных размерений, но и формы — для достижения необходимых величин волн.

Полученные результаты будут использованы для разработки методики выбора оптимальной формы и размеров поплавка-бульба, устанавливаемого в междукорпусном пространстве судов катамаранного типа для снижения волнового сопротивления за счет интерференции волновых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mandru A. Experimental study on catamaran hydrodynamics / A. Mandru, F. Pacuraru // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 916. — P. 012060. — DOI 10.1088/1757-899X/916/1/012060.
2. Saha G.K. Hydrodynamic optimization of a catamaran hull with large bow and stern bulbs installed on the center plane of the catamaran / G.K. Saha, K. Suzuki, H. Kai // Marine Science and Technology. — 2005. — Vol. 10, No. 1. — P. 32 — 40. — DOI 10.1007/s00773-004-0186-6.
3. Danisman D.B. Numerical and experimental investigation of the effect of bow flare angle on the resistance and seakeeping performance of catamarans / D.B. Danisman // Ocean Engineering. — 2014. — Vol. 91. — P. 227 — 234.
4. Havelock T.H. The wave resistance of a spheroid / T.H. Havelock // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. — 1931. — Vol. 131, No. 817. — P. 275 — 285.
5. Havelock T.H. The wave resistance of an ellipsoid / T.H. Havelock // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. — 1931. — Vol. 132, No. 820. — P. 480 — 486.
6. Kinoshita M. Wave-making resistance of a submerged spheroid, ellipsoid and a ship in a shallow sea / M. Kinoshita, T. Inui // Journal of Zosen Kiokai. — 1953. — Vol. 1953, Issue 75. — P. 119 — 135.
7. Huan J. Design of minimum drag bodies in incompressible laminar flow / J. Huan, V. Modi // Inverse Problems in Engineering. — 1996. — Vol. 3, No. 4. — P. 233 — 260. — DOI 10.1080/174159796088027626.
8. Benham G.P. Wave drag on asymmetric bodies / G.P. Benham, J.P. Boucher, R. Labbé, M. Benzaquen et al. // Journal of Fluid Mechanics. — 2019. — Vol. 878. — P. 147 — 168.
9. Петров А.А. Оценка ходкости судна на открытой воде после демонтажа носового бульба / А.А. Петров, А.А. Рябова, Ф.С. Рябов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 27 — 36. — EDN IEHYBY.
10. Чебан Е.Ю. Особенности волнообразования некоторых тел простой формы при больших числах Фруда // Транспорт. Горизонты развития — 2023: м-лы междунар. науч.-практ. форума / Е.Ю. Чебан, А.И. Кожевников, С.В. Бушков; ФГБОУ ВО «ВГУВТ». — 2023. [Электронный ресурс] URL: http://вф-река-море.рф/2023/PDF/3_15.pdf.
11. Чебан Е.Ю. Предварительная оценка гидродинамических характеристик большегрузного катамарана на мелководье с помощью численных методов / Е.Ю. Чебан, Д.В. Никущенко, Т.В. Старкова, Д.О. Жигалов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 23 — 34. — EDN ZFDNTR.
12. Чебан Е.Ю. Исследование волнообразования большегрузного катамарана для внутренних водных путей численными методами / Е.Ю. Чебан, Е.А. Лукина, С.Г. Митрошин, О.В. Мартынова и др. // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3-1 (61). — С. 210 — 219. — DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.021. — EDN PERDQG.
13. Чебан Е.Ю. Исследование волнообразования поплавков-бульбов большегрузного катамарана / Е.Ю. Чебан, А.И. Кожевников // Транспорт. Горизонты развития: труды 4-го Междунар. науч.-пром. форума, Нижний Новгород — Новосибирск — Владивосток — Самара, 23–26 апреля 2024 года. — Нижний Новгород: ВГУВТ, 2024. — С. 104. — EDN XPGFRW.
14. User Manual FINE™/Marine v8.2, Documentation v8.2 NUMECA International, 187-189, Chaussee de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
15. Никущенко Д.В. Численные методы в механике жидкости: уч. пос. / Д.В. Никущенко. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2025. — 144 с.
16. Чебан Е.Ю. Исследование волнообразования поплавков для использования в качестве бульбов большегрузных катамаранов / Е.Ю. Чебан, А.И. Кожевников // Научные проблемы водного транспорта. — 2024. — № 78. — С. 84 — 96. — DOI 10.37890/jwt.vi78.456. — EDN NZMKRT.
17. Tuck E.O. Wave patterns and minimum wave resistance for high-speed vessels / E.O. Tuck, D.C. Scullen, L. Lazauskas // 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan, 8–13 July. — 2002.

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. 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.
3. 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.
4. Havelock T.H. The wave resistance of a spheroid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. 1931. Vol. 131, No. 817. P. 275 — 285.
5. Havelock T.H. The wave resistance of an ellipsoid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. 1931. Vol. 132, No. 820. P. 480 — 486.
6. Kinoshita M., Inui T. Wave making resistance of a submerged spheroid, ellipsoid and a ship in a shallow sea. *Journal of Zosen Kiokai*. 1953. Vol. 1953, Issue 75. P. 119 — 135.
7. Huan J., Modi V. Design of minimum drag bodies in incompressible laminar flow. *Inverse Problems in Engineering*. 1996. Vol. 3, No. 4. P. 233 — 260. DOI 10.1080/174159796088027626.
8. Benham G.P., Boucher J.P., Labbé R., Benzaquen M. et al. Wave drag on asymmetric bodies. *Journal of Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 878. P. 147 — 168.
9. Petrov A.A., Ryabova A.A., Ryabov Ph.S. Assessment of the propulsion qualities of a ship in the open water after dismantling the bulbous bow. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 64/65. P. 27 — 36. EDN IEHYBY. (In Russ.)
10. Cheban E.Yu., Kozhevnikov A.I., Bushkov S.V. Peculiarities of wave formation of some bodies of simple shape at large Froude numbers. *Transport. Gorizonty razvitiya — 2023 [Transport. Development Horizons: International Scientific and Industrial Forum]*. Volga State University of Water Transport. 2023. URL: http://вф-река-море.рф/2023/PDF/3_15.pdf. (In Russ.)
11. Cheban E.Yu., Nikushchenko D.V., Starkova T.V., Zhigalov D.O. Preliminary estimation of hydrodynamic parameters of a large cargo catamaran in shallow water using numerical methods. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 74. P. 23 — 34. EDN ZFDNTR. (In Russ.)

12. Cheban E.Yu., Lukina E.A., Mitroshin S.G., Martemianova O.V. et al. Study of wave formation of a large cargo catamaran for inland waterways by numerical methods. *Marine Intellectual Technologies*. 2023. No. 3-1(61). P. 210 — 219. DOI 10.37220/MIT.2023.61.3.021. EDN PERDQG. (In Russ.)
13. Cheban E.Yu., Kozhevnikov A.I. Investigation of wave formation of bulbous floats of a heavy-duty catamaran. *Transport. Gorizonty razvitiya — 2024 [Transport. Development Horizons: Proceedings of the 4th International Scientific and Industrial Forum]*. Nizhny Novgorod — Novosibirsk — Vladivostok — Samara, April 23 — 26, 2024. Nizhny Novgorod: VGUVT, 2024. P. 104. EDN XPGFRW. (In Russ.)
14. User Manual FINE™/Marine v8.2, Documentation v8.2 NUMECA International, 187-189, Chaussee de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
15. Nikushchenko D.V. *Chislennyye metody v mekhanike zhidkosti [Computational techniques in fluid mechanics]*. St. Petersburg: SPbGMTU, 2025. 144 p.
16. Cheban E.Yu., Kozhevnikov A.I. The study of float wave formation for the usage as heavy-duty catamaran bulbs. *Nauchnye problemy vodnogo transporta [Russian Journal of Water Transport]*. 2024. No. 78. P. 84 — 96. DOI 10.37890/jwt.vi78.456. EDN NZMKRT. (In Russ.)
17. Tuck E.O., Scullen D.C., Lazauskas L. Wave patterns and minimum wave resistance for high-speed vessels. *24th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Fukuoka, Japan, 8–13 July 2002.