

УДК 531.391.1:532.5.011

DOI: 10.37890/jwt.vi76.388

## **Исследование влияния формы кормовой оконечности маломерного судна на его гидродинамические характеристики**

**Е.Ю. Чебан<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0000-0002-0983-9879>

**О.В. Мартемьянова<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0000-0001-9013-8510>

**М.Ю. Поляшова<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0009-0000-3098-4432>

**А.А. Мольков<sup>2</sup>**

<https://orcid.org/0000-0002-8550-2418>

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

<sup>2</sup>*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

**Аннотация.** Определение главных размерений маломерных судов при их проектировании является важной и сложной задачей ввиду большого количества взаимоисключающих друг друга факторов, влияющих на гидродинамические характеристики таких судов. Существующие закономерности для определения длины, ширины и осадки маломерных судов носят достаточно общий или нормативный характер, что усложняет их использование для судна конкретной конструкции. В этом случае необходима проверка технических решений, одним из способов которой может быть использование методов вычислительной гидродинамики (CFD). В настоящей работе приведены результаты численного моделирования движения катера в переходном режиме при числах Фруда до 1,2. Описан процесс подготовки и численного моделирования аэродинамики составного крыла в программном комплексе NUMECA/FineMarine™, обоснован выбор модели турбулентности и параметры расчетной сетки, в том числе разрешение пограничного слоя. Выполненное исследование влияния трех вариантов ширины и формы кормовой оконечности на изменение осадки, угла дифферента, смоченной поверхности и сопротивления катера. Увеличение ширины плоской глиссирующей части кормовой оконечности благоприятно сказывается на гидродинамических характеристиках маломерного судна даже при движении в переходном режиме при  $L/V$  от 3,5 до 3,99. В то же время использование расширения подводной части кормовой оконечности требует более подробного исследования.

**Ключевые слова:** численное моделирование, глиссирование, скоростное судно, дельфинирование, буксировочные испытания, NUMECA/FineMarine™, форма корпуса, гидродинамическое качество

## **Study of the influence of the vessel stern shape on its hydrodynamic characteristics**

**Egor Yu. Cheban<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0000-0002-0983-9879>

**Olga V. Martemianova<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0000-0001-9013-8510>

**Marina Yu. Polyashova<sup>1</sup>**

<https://orcid.org/0009-0000-3098-4432>

**Aleksandr A. Mol'kov<sup>2</sup>**

<https://orcid.org/0000-0002-8550-2418>

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

<sup>2</sup>*Institute of applied physics of the Russian academy of sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Determining the main dimensions of the small vessels while designing is an important and difficult task due to the large number of mutually exclusive factors affecting the hydrodynamic characteristics of such vessels. The existing patterns for determining the length, width and draft of small vessels are quite general. This complicates their usage for the vessel of a specific design. In this case, it is necessary to check technical solutions, one of the ways that may be implied is the usage of computational fluid dynamics (CFD) methods. This paper presents the results of the numerical simulation of boat movement in the transient mode with Froude numbers up to 1.2. The process of preparation and numerical modeling of the aerodynamics of a composite wing in the NUMECA/FineMarine™ software package is described, the choice of the turbulence model and the parameters of the computational grid, including the resolution of the boundary layer, is justified. The study of the influence of three variants of the width and shape of the aft tip on the change in draft, trim angle, wetted surface and resistance of the boat is carried out. An increase in the width of the flat planing part of the aft tip has a favorable effect on the hydrodynamic characteristics of a small vessel, even when moving in transition mode at  $L/B$  from 3.5 to 3.99. At the same time, the use of the extension of the underwater part of the aft tip requires a more detailed study.

**Keywords:** Numerical modeling, planing, high-speed vessel, delfining, towing tests, NUMECA/FineMarine™, hull shape, hydrodynamic quality

### **Введение**

Разработка и производство скоростных маломерных судов различного назначения в настоящее время является важной отраслью экономики и требует привлечения высоких технологий практически на всех этапах жизненного цикла. Это связано в первую очередь, со сложностью гидро- и аэродинамических процессов, происходящих при их движении. Гидродинамические характеристики (ГДХ) скоростных маломерных судов обусловлены взаимодействием корпуса судна и его элементов (реданов, подводных крыльев и т.п.) со свободной поверхностью жидкости и потоком воздуха при высоких скоростях движения. Это вызывает в свою очередь возникновение отрывных течений, брызгообразование, удар о поверхность воды, кавитацию и другие гидродинамические явления, учет которых крайне сложен при проектировании конкретного судна. Важность изучения влияния геометрии корпуса на ГДХ обусловлена все большим распространением судов с пониженным уровнем потребления топлива и выбросов от энергетической установки, а также и полностью электрических судов, что требует более точного определения необходимой мощности двигателей и максимально возможного снижения сопротивления для обеспечения необходимой скорости и дальности плавания.

Исследованию влияния формы корпуса на ГДХ скоростных маломерных судов посвящено большое число исследовательских работ. Первые исследования в этой области относятся еще к началу XX века: призматические глиссирующие поверхности, Baker [1]; комплексные эксперименты в области гидродинамики глиссеров, Зотторф [2]. Большой объем экспериментальных данных, описывающих ГДХ глиссирующей пластины с постоянной килеватостью при фиксированной посадке судна и постоянной скорости, представлен в работах Shoemaker [3], Sambraus [4], Locke [5].

В 1947 году в лаборатории Дэвидсона Института технологий Стивенсона были проведены теоретические и экспериментальные исследования глиссирования и получены закономерности, описывающие всплытие глиссирующей поверхности, сопротивление, смоченную поверхность, распределение давления, воздействующие силы, форму кильватерного следа, формирование брызг, динамическую устойчивость.

Особого внимания заслуживают работы Корвин-Кроковского и Савитски [6] по исследованию глиссирования, включая исследование сопротивления и подъемной

силы для смоченной поверхности. Позже Мюррэй [7] использовал их результаты для разработки методов расчета параметров глиссирования. В 1954 году Савитский и Нейдингер [8] разработали эмпирические способы описания глиссирования и увеличили диапазон применимости полученных ранее уравнений. В области гидродинамики реданных корпусов большой объем исследований был выполнен Е. Клементом [9]. Среди отечественных ученых, исследованиями в области глиссирования занимались многие выдающиеся гидродинамики: Г.Е. Павленко, С.А. Чаплыгин, Н.А. Соколов, Н.С. Володин, А.М. Ваганов [18], К.П. Харитонов, Я.И. Войткунский, В.И. Блюмин, Л.А. Иванов, М.Б. Масеев, Л.И. Седов [10], И.Т. Егоров, В.Т. Сколов [11]. В результате их исследований были разработаны основы современной теории глиссирования, методы оценки сопротивления глиссирующих судов, подходы к проектированию скоростных судов.

Однако практически во всех работах приведены закономерности для главных размерений корпусов скоростных судов в достаточно широком диапазоне их изменения, что соответственно приводит к изменению ГДХ так же в широком диапазоне. С другой стороны, даже незначительное изменение длины или ширины судна приводит к существенному перераспределению давлений по поверхности корпуса и изменению характера движения судна, вплоть до возникновения аварийных ситуаций [23]. Это вызывает необходимость проверки соответствия ГДХ конкретного спроектированного судна требованиям заказчика или нормативных документов.

В настоящей работе исследовалось влияние изменения ширины кормовой оконечности маломерного судна на его гидродинамические характеристики с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD).

### **1. Обоснование параметров численного моделирования в CFD-пакете NUMECA/FineMarine™**

Использование методов вычислительной гидродинамики (CFD) для исследования гидродинамики скоростных, в том числе маломерных судов, позволяет не только определять сопротивление движению, но и получать дополнительную информацию о распределении давлений по поверхности корпуса, а также данные об изменении посадки судна при его движении. В данной работе использовался программный комплекс NUMECA/FineMarine™, основанный на подходе RANS и предназначенный для решения специализированных задач корабельной гидродинамики, включая определение сопротивления движению судна, расчет маневренных качеств, моделирование кавитации и работы движителей [14-17, 20].

Выполненные ранее исследования гидродинамики скоростных маломерных судов в условиях ходовых испытаний с помощью программного комплекса NUMECA/FineMarine™, свидетельствуют о хорошем соответствии результатов экспериментов и численного моделирования [14-17, 20]. Например, сравнение результатов численного моделирования и натурных буксировочных испытаний модели катера длиной 1,35 м (в масштабе 1:4), предоставленных ООО «НПП «Спиннинглайн боатс» [20] позволило сделать вывод о достаточной точности численного моделирования с использованием NUMECA/FineMarine™ (см. рис.1). Как показано в работе [20] отличия в результатах численного моделирования и эксперимента обусловлены неучтенными факторами во время испытаний на открытой воде (ветер, течения, влияние судна-буксировщика) и дельфинированием катера при его движении. В то же время точность полученных результатов позволяет использовать аналогичные настройки, в том числе сетку для аналогичных случаев исследования гидродинамики глиссирующих судов.

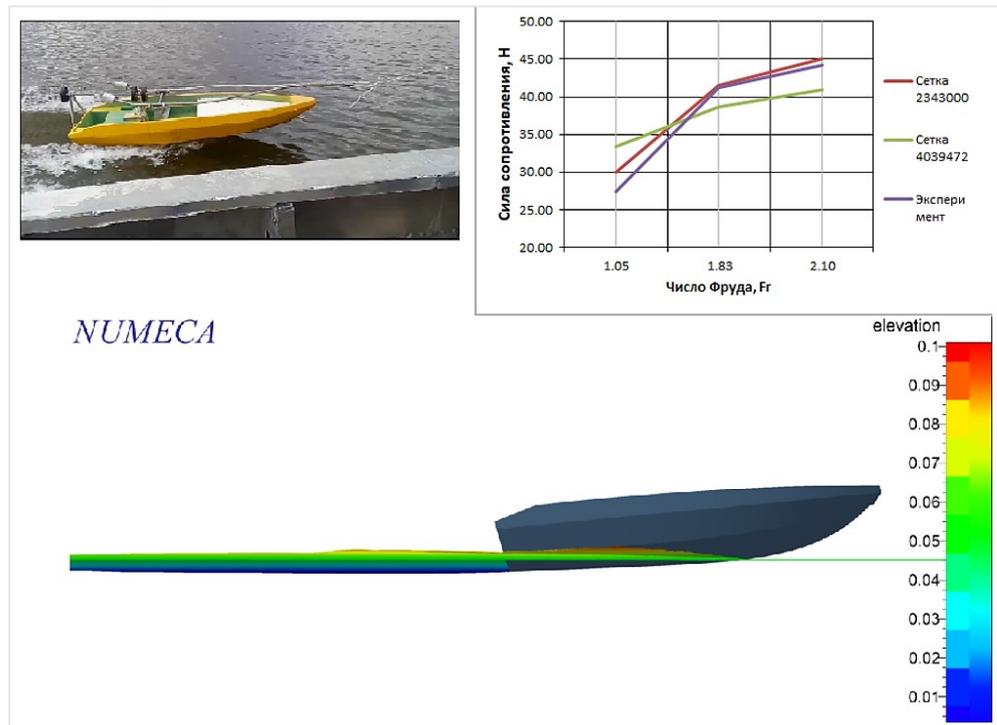


Рис. 1. Результаты численного моделирования буксировочных испытаний катера на открытой воде

## 2. Описание объекта исследования и его гидродинамических особенностей.

Основной задачей настоящей работы являлось изучение влияния формы кормовой оконечности корпуса маломерного судна на его гидродинамические характеристики.

В качестве прототипа для исследования использовался катер «Ретро-850», характеристики которого приведены в табл. 1, внешний вид судна показан на рис. 2. Выбор данного судна в качестве объекта исследования обусловлен соотношением главных размерений судна, в первую очередь  $L/B$ . Например, в соответствии с [18] для глиссирующих судов отношение  $L/B$  может быть определено по формулам:

$$L/B = 1,45\sqrt{L} - 0,002L^2 \quad (1)$$

$$L/B = (0,1L + 2,3) \pm 0,25 \quad (2)$$



Рис. 2. Внешний вид катера «Ретро 850»

Таблица 1

**Технические характеристики катера «Ретро-850»**

	Характеристика	Значение
1.	Длина, (наибольшая), м	9,1
2.	Длина по КВЛ, м	8,61
3.	Ширина (наибольшая), мм	2,45
4.	Высота, (наибольшая), мм	2,6
5.	L/B	3,51
6.	B/T	4,71
7.	Вес без топлива, т	3.5
8.	Запас топлива, л	600
9.	Запас воды, л	180
10.	Пассажировместимость, чел	6
11.	Осадка порожнем, мм	450
12.	Осадка в грузу, мм	520
13.	Двигатель	MerCruiser 5.0
14.	Мощность, л.с.	220
15.	Движитель	откидная колонка Alpha One

Исходной для определения соотношения L/B является длина корпуса судна, далее определяется ширина – ключевой параметр глиссирующего судна, поскольку ширина определяет гидродинамическое качество судна. С другой стороны, гидродинамическое качество зависит от центровки и значения коэффициента динамической нагрузки  $C_D$ . Увеличение ширины приводит к снижению величины коэффициента  $C_D$  и возникновению неустойчивого вертикально-продольного движения, приводящего к рикошетированию. Сопротивление в этом случае возрастает, а гидродинамическое качество падает. С другой стороны, существенное уменьшение ширины отрицательно влияет на начальную остойчивость и поперечную динамическую остойчивость, затрудняет выход на режим глиссирования из-за увеличения протяженности «горба сопротивления», но происходит улучшение продольной остойчивости и повышение мореходности из-за снижения динамических нагрузок при ударах о поверхность воды.

Ширина глиссирующего судна также определяется соотношением B/T, влияние которого проявляется в водоизмещающем и переходном режимах движения, определяя путь и время при разгоне. Увеличение B/T ускоряет выход на режим глиссирования, при ухудшении мореходности судна.

Особенностью катера является его движение при числах Фруда в диапазоне 0,326 – 1,197 (табл. 2), что недостаточно для развитого глиссирования ( $F_r=2-5$ ) и соответствует скорее переходному режиму и еще больше усложняет задачу определения необходимой ширины корпуса.

Можно отметить, что сами рекомендации по величине отношения L/B основываются по большей части на статистических данных и опыте проектирования подобных судов. Например, формулы (1) и (2) дают различные результаты, хотя могут использоваться для судов одних и тех же размерений. Большинство рекомендаций, отраженных в результатах научных исследованиях относятся к достаточно большим глиссирующим судам, длиной более 10 м и движущихся в режиме устойчивого глиссирования. Таким образом, некоторые вопросы гидродинамики маломерных судов остаются не до конца исследованными.

Таблица 2

**Числа Фруда и Рейнольдса при различных скоростях движения катера**

Скорость, м/с	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Число Фруда (Fr)	0,326	0,435	0,544	0,653	0,761	0,87	0,979	1,088	1,197
Число Рейнольдса (Re) · 10 <sup>7</sup>	8,31	7,55	6,661	6,045	5,289	4,53	3,778	3,022	2,267

Таким образом, определение ширины глиссирующего судна, особенно небольших размерений, представляет собой сложную задачу, при решении которой необходимо учитывать множество факторов, в том числе противоречащих друг другу.

При первоначальной проработке главных размерений катера было определено, что ширина корпуса исходя из условия обеспечения остойчивости, размещения людей, систем и устройств и т.д. может составлять от 2,16 м до 2,46 м. Соответственно были смоделированы три варианта кормовых обводов корпуса:

- «вариант 1» (B=2,16м., L/B=3,99; рис. 3а);
- «вариант 2» (B=2,34м., L/B=3,68; рис. 3б);
- «вариант 3» (B=2,46м., L/B=3,5; рис. 3в).

Корпус «вариант 3» имеет расширение в форме крыльевого профиля, исходя из предположения о возможности создания дополнительной подъемной силы.

### 3. Численное моделирование гидродинамики катера

Для численного моделирования была разработана твердотельная геометрия катера с разной формой обводов в кормовой части, представленная на рис. 3. Носовые обводы оставались постоянными, как и килеватость корпуса.

Численное моделирование выполнялось в CFD пакете NUMECA/FineMarine™, основанном на подходе RANS и предназначенном для решения задач корабельной гидродинамики.

В исследовании рассматривалась только гидродинамика корпуса, поэтому моделирование аэродинамики надстройки не выполнялось, и геометрия была разработана только на уровне палубы катера. В то же время влияние потока воздуха на корпус выше поверхности воды, а также взаимодействие сред при моделировании учитывалось с помощью функции VOF, позволяющей отобразить свободную поверхность жидкости.

Параметры расчетной области и граничные условия выбирались в соответствии с рекомендациями [13, 14] с удлинением в кормовую часть не менее пяти длин судна для точного расчета гидродинамического следа за катером (рис. 4). Итоговые размеры расчетной области составили:

- длина в нос – 12 м;
- ширина – 17,5 м;
- длина в корму – 40 м;
- глубина – 15,7 м.

Ввиду симметрии моделировалась только половина катера по диаметральной плоскости с установкой граничного условия «симметрия». Расстановка граничных условий на гранях расчетного домена и их описание приведены в табл. 3.

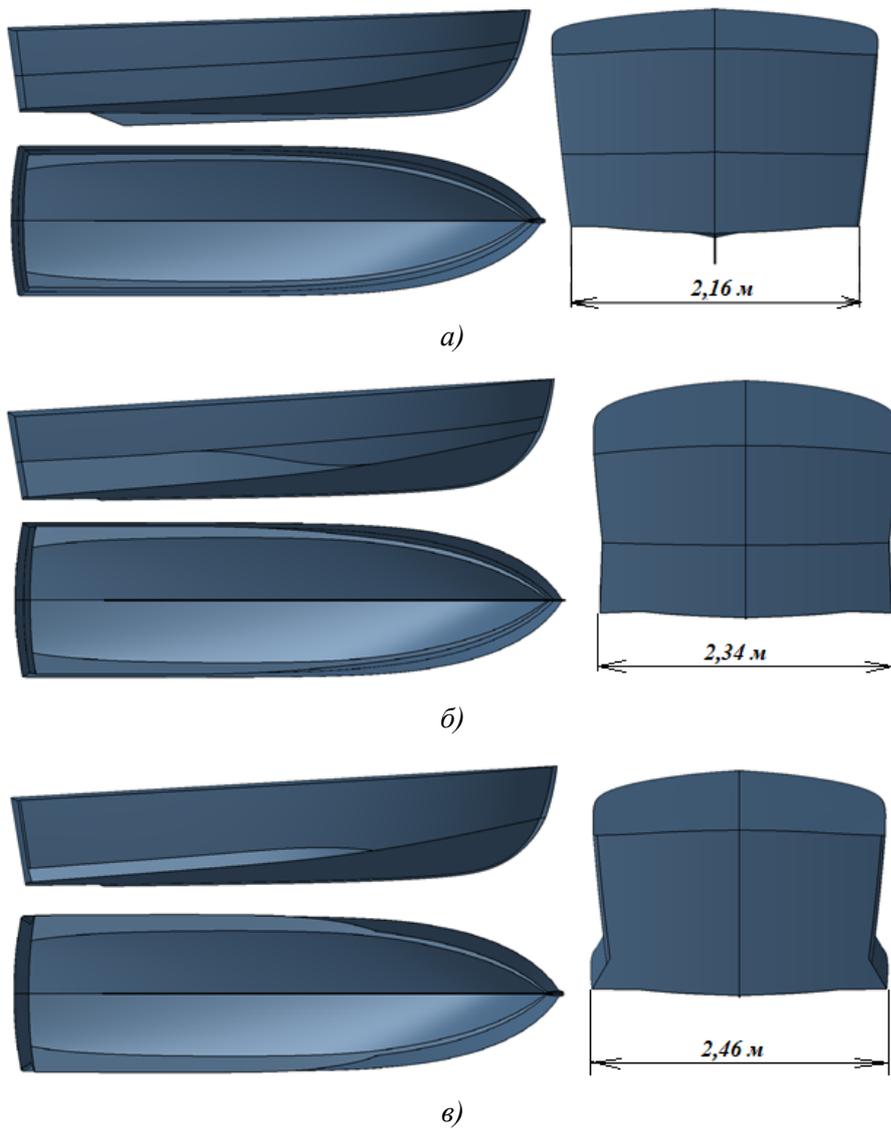


Рис. 3. Твёрдотельная геометрия для численного моделирования: а) – «вариант 1» (В=2,16 м); б) «вариант 2» (В=2,34м); в) «вариант 3» (В=2,43м).

Для моделирования использовалась неструктурированная расчетная сетка, параметры которой приведены в табл.4. Для более детального разрешения волновой поверхности и брызгообразования в кормовой части было выполнено дополнительное измельчение сетки в районе кормовой оконечности в виде сектора и бокса (рис.5).

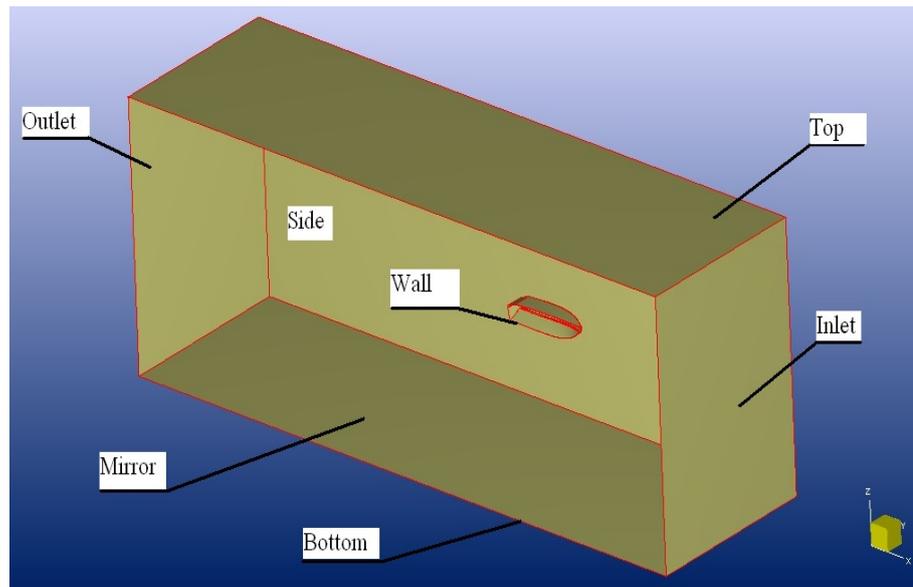


Рис. 4. Общий вид и размеры расчетной области

Таблица 3

**Граничные условия на границах расчетного домена**

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 – равенство нулю нормальных и касательных составляющих скорости)
Корпус катера	all solids – «Wall function» – пристеночные функции
Палуба	«Slip» (zero shear stress)

Таблица 4

**Параметры расчетной сетки**

	Параметры сетки
Начальная сетка	2688 (28x8x12)
Адаптация геометрии:	
дно	6
борт	6
транец	8
дно (плоская часть)	7
киль	9
свободная поверхность	8
Разрешение пограничного слоя $y^+=50$	$18, y_{wall}=2,9045 \cdot 10^{-4}$
Итоговое количество ячеек	Вариант 1 - 3580429 Вариант 2 - 3548357 Вариант 3 - 3484375
Измельчение в области волновой поверхности за кормой:	
- бокс	8
- сектор	8

Параметр  $y^+$  в соответствии с [13,14] достигал значения 50, т.к. судно движется в режиме близком к глиссированию и сопротивление трения имеет тенденцию к снижению. Значение  $y_{wall}=2,9045 \cdot 10^{-4}$ , количество призматических слоев на несущих поверхностях корпуса – до 18.

Задача решалась в нестационарной постановке, судно имело три степени свободы: движение вперед, вращение относительно оси  $y$  и всплытие (перемещение вдоль оси  $z$ ). Постановка задачи – прямая: судно движется в неподвижной жидкости. Разгонный участок определялся законом  $1/2$  синусоиды и 7 секунд при скорости 3 м/с с последующим увеличением времени разгона.

Параметры расчета приведены в таблице 5.

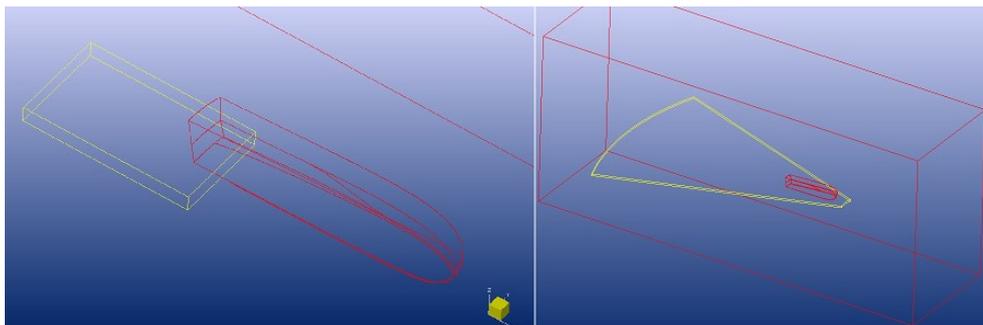


Рис.5. Области дополнительного измельчения сетки

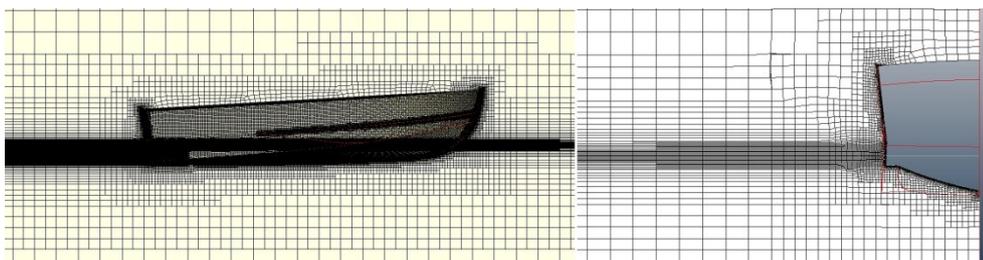


Рис.6. Общий вид сетки

Таблица 5

**Параметры расчета**

	Параметр	Значение
1.	Количество степеней свободы	3
2.	Постановка	нестационарная задача
3.	Схема дискретизации по времени:	2 порядка назад
4.	Модель турбулентности	K- $\omega$ SST модель турбулентности с пристеночными функциями

**4. Результаты и обсуждение**

Результаты численного моделирования представлены в виде графиков различных характеристик на рис. 7-9. При моделировании корпуса «вариант 3» массой 4,88 кг возник сильный эффект рикошетирования корпуса при скоростях выше 9,0 м/с, приводящий к интенсивному раскачиванию и в последующем, затоплению корпуса. В связи с этим водоизмещение катера было уменьшено до 3,8 т за счет снижения пассажироместимости, запасов топлива, воды и т.д. Для сравнения результатов с предыдущими вариантами, был также облегчен катер «вариант 2» до 3,8 т.

Из анализа графиков видно, что осадки облегченных вариантов катера оказались меньше, в то же время катер «вариант 2» шириной 2,34 м также имеет меньшую осадку, несмотря на большее водоизмещение, однако уменьшения осадки недостаточно для утверждения о выходе судна на режим глиссирования.

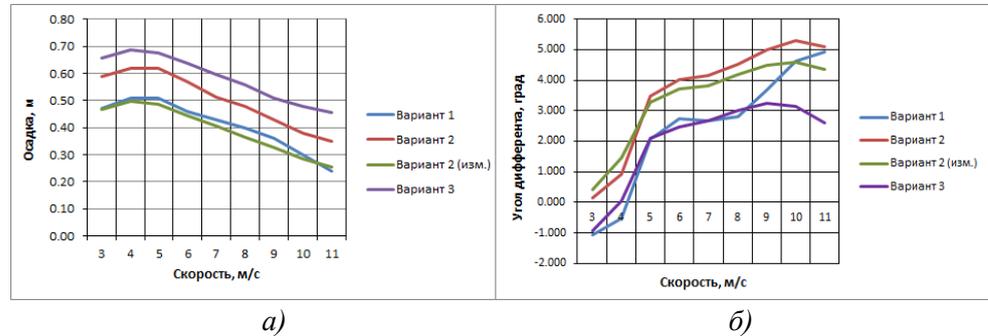


Рис. 7. Изменение посадки катера в зависимости от скорости движения. а) изменение осадки, м; б) изменение угла дифферента, град.

Это подтверждается графиками изменения осадки (угол со знаком «-» означает изменение угла в нос, «+» – в корму), причем облегченные корпуса имеют практически одинаковую тенденцию изменения углов дифферента. Наибольшее изменение углов дифферента происходит при скоростях от 3 до 5 м/с, и при 9-10 м/с графики дифферента проходят максимум углов за исключением «варианта 1», для которого максимум наблюдается при 11 м/с. Аналогично ведут себя и графики сопротивления (рис. 9), проходя «горб сопротивления» для вариантов 1 и 2 при скоростях 9-10 м/с. Сопротивление для облегченных вариантов предсказуемо оказывается ниже, и по всей видимости, большее расширение корпуса не приводит к изменению сопротивления (графики на рис. 9 для этих вариантов практически неотличимы и накладываются друг на друга). С учетом неудачного моделирования «варианта 3» водоизмещением 4,88 т, можно предположить, что использование крыльевого профиля кормового расширения корпуса нуждается в более детальной проработке.

Анализ волновой поверхности показывает, что генерируемые облегченными корпусами волны, значительно ниже вариантов 1 и 2 (рис. 10). Ширина области брызгообразования меньше всего у «варианта 2» (рис. 11), кроме того, она незначительно перемещаются в корму, но по всей видимости достаточно для снижения общего сопротивления и увеличения угла дифферента. В то же время, можно считать, что увеличение ширины благоприятно сказывается на гидродинамических характеристиках катера при его движении даже в переходном режиме.

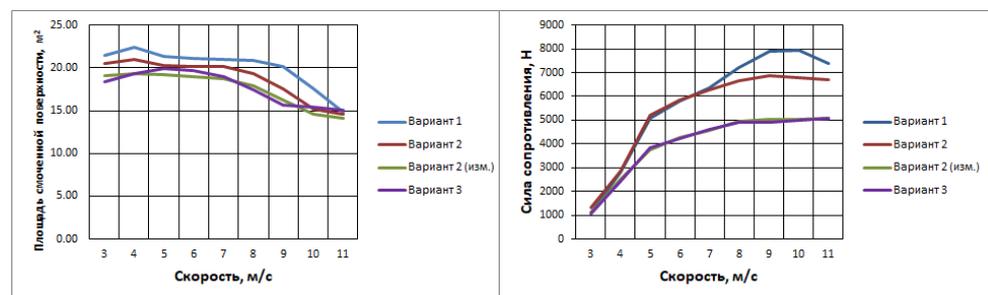


Рис. 8. Изменение площади смоченной поверхности для корпусов различной ширины

Рис. 9. Сопротивление корпусов различной ширины

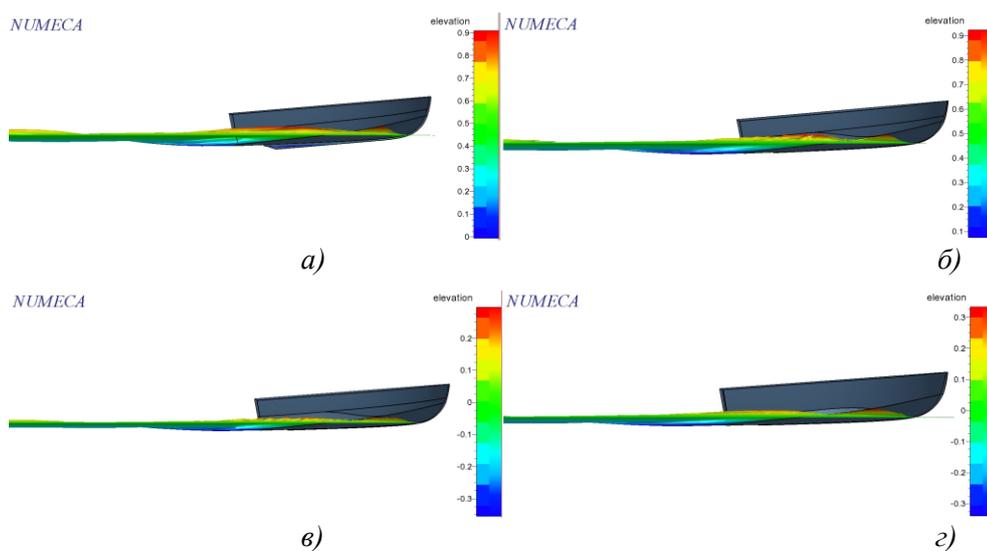


Рис. 10. Волновая поверхность и посадка корпусов катера с различной шириной кормовой части при скорости 11 м/с: а) «вариант 1»; б) «вариант 2»; в) «вариант 2 (изм.)»; г) «вариант 3».

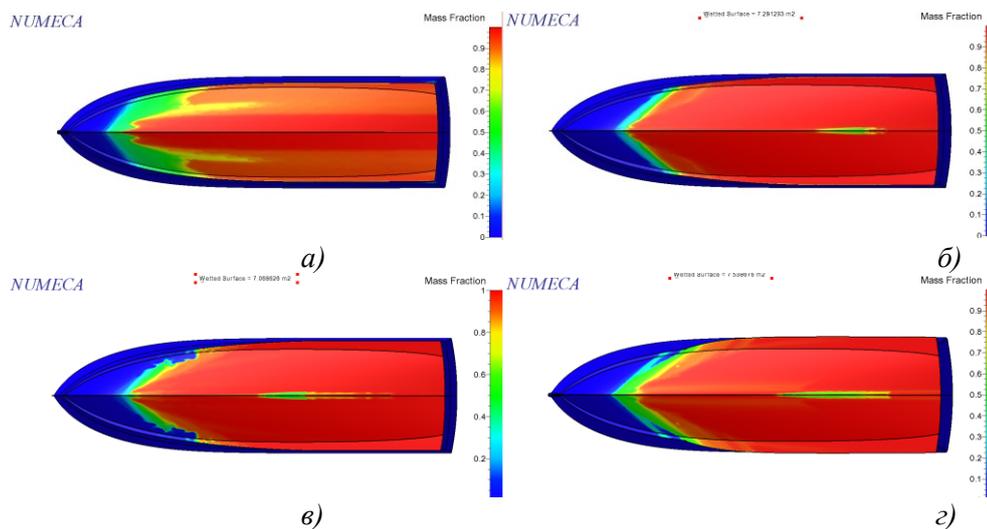


Рис. 11. Сопоставление смоченной поверхности корпусов с различной шириной кормовой части при скорости 11 м/с: а) «вариант 1»; б) «вариант 2»; в) «вариант 2 (изм.)»; г) «вариант 3».

## 5. Заключение

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния ширины и формы кормовой оконечности катера, движущегося в переходном режиме при числе Фруда порядка 1,2. С помощью методов вычислительной гидродинамики исследованы три варианта формы кормовой оконечности и получены данные для сопротивления, осадки, угла дифферента и смоченной поверхности. Описаны параметры численного расчета и подходы к построению расчетной сетки на основе испытаний модели глиссирующего судна.

### Благодарности

Авторы статьи благодарят д.т.н., проректора по научной работе ФГБОУ ВО «СПБГМТУ» Д.В. Никущенко за помощь при выполнении исследований.

### Список литературы

1. Baker G.S. Some Experiments in Connection with the Design of Floats for Hydro-Aeroplanes, ARC (British) R & M, № 70, 1912.
2. Sottorf W. Experiments With Planing Surfaces, NACA TM 661, 1932 and NACA TM 739, 1934.
3. Shoemaker J.M. Tank Tests of Flat and Vee-Bottom Planing Surfaces, NACA TN 509, November 1934.
4. Sembraus A. Planing Surface Tests at Large Froude Numbers-Airfoil Comparison, NACA TM №. 848, February 1938.
5. Locke Jr., F.W.S. Tests of a Flat Bottom Planing Surface to Determine the Inception of Planing, Navy Department, BuAer, [Research Division Report No. 1096], December 1948.
6. Korvin-Kroukovsky B.V., Savitsky D., Lehman W. Wetted Area and Center of Pressure of Planing Surfaces, Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory Report №. 360, August 1949.
7. Murray A.B. The Hydrodynamics of Planing Hulls, [Meeting of the New England Section of SNAME, February 1950], 1950.
8. Savitsky D., Neiclinger J.W. Wetted Area and Center of Pressure of Planing Surfaces at Very Low Speed Coefficients, Stevens Institute of Technology, [Davidson Laboratory Report №. 498], July 1954.
9. Clement E.P. A configuration for a stepped planning boat having minimum drag (dynaplane boat). Monograph. Second edition. 2005 (published by author), 76p.
10. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. Изд. 2, исп. – М.: Изд-во «Наука», 1966. 448 с.
11. Егоров И.Т., Соколов В.Т. Гидродинамика быстроходных судов. – Л.: Судостроение, 1971. 424 с.
12. Theoretical Manual ISIS-CFD v7.1 Equipe Modélisation Numérique, Laboratoire de Mécanique des Fluides, CNRS-UMR 6598, Ecole Centrale de Nantes, B.P. 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France.
13. User Manual FINET<sup>TM</sup>/Marine v7.1, Documentation v3.1a NUMECA International, 187-189, Chaussee de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
14. Garo R., Imas L. Hydrodynamic Performance of a Submerged Lifting Surface Operating at High Speed, [4th High Performance Yacht Design Conference], 2012.
15. Wackers J., Ait Said K., Deng Gan Bo, Queutey P., Visonneau M., Mizine I. Adaptive Grid Refinement Applied to RANS Ship Flow Computation, [28th Symposium on Naval Hydrodynamics], 2010.
16. Roux Y., Wackers J., Dorez L. Slamming computation on the multihull Groupama 3, [The second international conference on innovation in high performance sailing yachts, 30 June - 1 July 2010 «Innovsail 2010»], 2010.
17. Wackers J, Ait Said K, Deng GB, Queutey P, Visonneau M, Mizine I. Adaptive grid refinement applied to RANS ship flow computation. In: [28th Symposium on naval hydrodynamics]. Pasadena, California; 2010.
18. Ваганов А.М. Проектирование скоростных судов. – Л.: Изд-во «Судостроение», 1978 - 280с.
19. Даняев А. Гидродинамика и «рюшечки» // «Катера и яхты», 2 (224), 2010, С. 44-49.
20. Чебан, Е.Ю. Исследование влияния некоторых особенностей формы корпусов глиссирующих судов на их сопротивление численными методами / Е.Ю. Чебан, Д.В. Никущенко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2017. – № 48-49. – С. 59-69. – EDN ZULPNP.
21. Исследование влияния формы катера типа "RIB" на его гидродинамические характеристики численными методами / Е.Ю. Чебан, О.В. Мартемьянова, С.В. Гачев, А.А. Мухина // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2019. – № 59. – С. 79-90. – EDN CQMOIC.

### References

1. Baker G.S. Some Experiments in Connection with the Design of Floats for Hydro-Aeroplanes, ARC (British) R & M, № 70, 1912.
2. Sottorf W. Experiments With Planing Surfaces, NACA TM 661, 1932 and NACA TM 739, 1934.
3. Shoemaker J.M. Tank Tests of Flat and Vee-Bottom Planing Surfaces, NACA TN 509, November 1934.
4. Sambraus A. Planing Surface Tests at Large Froude Numbers-Airfoil Comparison, NACA TM №. 848, February 1938.
5. Locke Jr., F.W.S. Tests of a Flat Bottom Planing Surface to Determine the Inception of Planing, Navy Department, BuAer, [Research Division Report No. 1096], December 1948.
6. Korvin-Kroukovsky B.V., Savitsky D., Lehman W. Wetted Area and Center of Pressure of Planing Surfaces, Stevens Institute of Technology, Davidson Laboratory Report №. 360, August 1949.
7. Murray A.B. The Hydrodynamics of Planing Hulls, [Meeting of the New England Section of SNAME, February 1950], 1950.
8. Savitsky D., Neiclinger J.W. Wetted Area and Center of Pressure of Planing Surfaces at Very Low Speed Coefficients, Stevens Institute of Technology, [Davidson Laboratory Report №. 498], July 1954.
9. Clement E.P. A configuration for a stepped planning boat having minimum drag (dynaplane boat). Monograph. Second edition. 2005 (published by author), 76p.
10. Sedov L.I. Ploskie zadachi gidrodinamiki i ajerodinamiki. Izd. 2, isp. – M.: Izd-vo «Nauka», 1966. 448 s.
11. Egorov I.T., Sokolov V.T. Gidrodinamika bystrohodnyh sudov. – L.: Sudostroenie, 1971. 424 s.
12. Theoretical Manual ISIS-CFD v7.1 Equipe Modélisation Numérique, Laboratoire de Mécanique des Fluides, CNRS-UMR 6598, Ecole Centrale de Nantes, B.P. 92101, 44321 Nantes Cedex 3, France.
13. User Manual FINE™/Marine v7.1, Documentation v7.1a NUMECA International, 187-189, Chaussee de la Hulpe 1170 Brussels, Belgium.
14. Garo R., Imas L. Hydrodynamic Performance of a Submerged Lifting Surface Operating at High Speed, [4th High Performance Yacht Design Conference], 2012.
15. Wackers J., Ait Said K., Deng Gan Bo, Queutey P., Visonneau M., Mizine I. Adaptive Grid Refinement Applied to RANS Ship Flow Computation, [28th Symposium on Naval Hydrodynamics], 2010.
16. Roux Y., Wackers J., Dorez L. Slamming computation on the multihull Groupama 3, [The second international conference on innovation in high performance sailing yachts, 30 June - 1 July 2010 «Innovsail 2010»], 2010.
17. Wackers J., Ait Said K., Deng GB, Queutey P., Visonneau M., Mizine I. Adaptive grid refinement applied to RANS ship flow computation. In: [28th Symposium on naval hydrodynamics]. Pasadena, California; 2010.
18. Vaganov A.M. Proektirovanie skorostnyh sudov. – L.: Izd-vo «Sudostroenie», 1978 - 280s
19. Danjaev A. Gidrodinamika i «rjushechki» // «Katera i jahty», 2 (224), 2010, S. 44-49.
20. Cheban E.Yu., Study of the effect of a speed boat hull design on water resistance by numerical methods / Cheban E.Yu., Nikuschenko D.V. // Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. – 2017. – № 48-49. – С. 59-69. – EDN ZULPNP.
21. A study of the "rib" boat's hull form effect on the hydrodynamic characteristics by numerical methods / Cheban Yegor Y., Martemianova Olga V., Gachev Sergey V., Mukhina Alina A. // Bulletin of VSAWT. – 2019. – № 59. – С. 79-90. – EDN CQMOIC.

### 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

#### **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,

транспорта», 603905, Нижний Новгород,  
Нестерова 5, e-mail:  
egor.cheban.2@gmail.com

**Мартемьянова Ольга Вадимовна**  
аспирант кафедры гидродинамики, теории  
корабля и экологической безопасности  
судов, ФГБОУ ВО «Волжский  
государственный университет водного  
транспорта», 603951, г. Нижний Новгород,  
ул. Нестерова, 5, e-mail: dovnn@yandex.ru

**Поляшова Марина Юрьевна**  
Магистрант ФГБОУ ВО «Волжский  
государственный университет водного  
транспорта», 603951, г. Нижний Новгород,  
ул. Нестерова, 5, e-mail:  
m.polyashova@list.ru

**Мольков Александр Андреевич**  
Старший научный сотрудник, Лаборатория  
оптических методов (221), Отдел  
радиофизических методов в гидрофизике  
(220); «Федеральный исследовательский  
центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук» 603950, г.  
Нижний Новгород, БОКС-120, ул.  
Ульянова, 46, molkov@ipfran.ru

603905, Nizhny Novgorod, Nesterova 5, e-  
mail: egor.cheban.2@gmail.com

**Olga V. Martmianova**  
postgraduate student of Hydrodynamics, ship  
theory and ship's ecological safety department,  
Volga State University of Water Transport  
603950, Nizhniy Novgorod, Nesterova, 5, e-  
mail: dovnn@yandex.ru

**Marina Yu. Polyashova**  
Master student, Volga State University of  
Water Transport 603950, Nizhniy Novgorod,  
Nesterova, 5, e-mail: m.polyashova@list.ru

**Aleksandr A. Mol'kov**  
Senior Researcher, Optical Methods  
Laboratory (221), Department of  
Radiophysical Methods in Hydrophysics (220)  
Federal Research Center Institute of Applied  
Physics of the Russian Academy of Sciences  
(IAP RAS) 46 Ul'yanov Street, Nizhny  
Novgorod, 603950, Russia, molkov@ipfran.ru

Статья поступила в редакцию 15.05.2023; опубликована онлайн 20.09.2023.  
Received 15.05.2023; published online 20.09.2023.