

УДК 531.391.1:532.5.011
DOI: 10.37890/jwt.vi86.690

Исследование гидродинамики маломерного судна с тоннельной кормой численными методами

Е.Ю. Чебан¹

ORCID: 0000-0002-0983-9879

Д.В. Никущенко²

ORCID: 0000-0001-8549-772X

А.А. Моляков³

ORCID: 0000-0002-8550-2418

¹*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Россия*

³*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Тоннели в корпусе маломерного судна являются одним из способов повышения гидродинамических характеристик. В работе изложены результаты численного моделирования гидродинамики маломерного судна с тоннелем в кормовой части днища кормой $D=250$ мм, $D=375$ мм и $D=420$ мм при движении со скоростями от 10 м/с до 22 м/с, что соответствует диапазону чисел Фруда от 2.090, до 4.597 в переходном режиме и режиме устойчивого глиссирования. Параметры численного моделирования, включая расчетную сетку, модель турбулентности и т.д., устанавливались на основании сравнения с результатами модельных экспериментов, которое показало хорошее совпадение. В результате численного моделирования установлено, что появление тоннелей приводит к уменьшению осадки и угла дифферента, но одновременно к повышению сопротивления. Наилучшие значения гидродинамических характеристик получены для тоннеля $D=375$ мм. Замечено, что тоннель позволяет получать волны большей высоты, чем судно без тоннеля, которые могут быть использованы для водных видов спорта. Использование тоннелей требует тщательного одновременного учета всех гидродинамических особенностей корпуса маломерного глиссирующего судна.

Ключевые слова: тоннель, вычислительная гидродинамика, глиссирование, гидродинамические характеристики, сопротивление, маломерное судно, модельные испытания

CFD study on hydrodynamic of a boat with a tunnel stern

Egor Yu. Cheban¹

ORCID: 0000-0002-0983-9879

Dmitry V. Nikushchenko²

ORCID: 0000-0001-8549-772X

Alexandr A. Mol'kov³

ORCID: 0000-0002-8550-2418

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

²*St. Petersburg state marine technical university, St. Petersburg, Russia*

³*Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. Tunnels in the hull of a boat are one of the ways to improve the hydrodynamic characteristics. This paper presents the results of numeral modelling of the hydrodynamics of a boat with a tunnel in the stern part of the bottom. The diameter of the tunnels was $D=250\text{mm}$, $D=375\text{mm}$ and $D=420\text{mm}$. Boat moving at speeds from 10 m/sec to 22 m/sec, which corresponds to the range of Froude number raging from 2.080 to 4.597 in the transient mode and stable planing mode. The parameters of numerical modelling, including computational grid, turbulence model, etc., were established based on comparison with the results of the model experiments showing good agreement. As a result of numerical modelling, it was found that the appearance of tunnels leads to a decrease in draft and trim angle, but at the same time leads to an increase in drag. The best values of the hydrodynamic characteristics were achieved for the tunnel $D=375\text{mm}$. It has been noted, that the tunnel produces higher waves than a vessel without a tunnel which can be used for water sports. The use of tunnels requires careful consideration of all hydrodynamic properties of a planing boat's hull.

Keywords: speed boat, tunnel hull, CFD, hydrodynamic characteristics, hydrodynamic quality, hydrodynamic characteristics, planning regime, towing test.

Введение

Различные условия эксплуатации маломерных судов требуют создания соответствующих форм корпусов, включающие продольные и поперечные реданы, транцевые плиты, выпрямители и т.д. Все эти элементы так или иначе позволяют управлять потоком жидкости вокруг корпуса с целью улучшения мореходных качеств и потребительских характеристик маломерных судов. Одним из таких элементов могут быть тоннели, представляющие собой специальные обтекатели или внутренние каналы на корпусе судна.

Установка тоннелей на высокоскоростные суда может позволить снизить волновое и брызговое сопротивление за счет создания зон пониженного давления и уменьшения интенсивности локальных турбулентных вихрей. Тоннели могут повышать устойчивость судна при резких маневрах или воздействии внешних факторов, таких как волновые воздействия и порывы ветра.

Одной из причин использования тоннелей на маломерных судах в условиях мелководных водоемов является попытка защитить движительно-рулевой комплекс, в первую очередь водометный, от ударов и плавающих предметов. С этой же целью существуют попытки установки тоннелей на маломерные суда с традиционным подвесным мотором и гребным винтом (рис.1).



Рис. 1. Варианты тоннеля в кормовой части маломерного судна с гребным винтом (источник фотографий <https://spyship.ru/testy/zashhita-lodochnogo-motora-i-grebnogo-vinta-tunnelem.html>)

Размеры и форма тоннеля должны обеспечивать плавное перенаправление потоков без создания дополнительных зон с повышенным давлением или турбулентностью, однако из практики известно, что использование обводов

быстроходных и скоростных судов с тоннелями не всегда приводит к желаемому повышению гидродинамических характеристик (ГДХ), поскольку любые изменения формы корпуса приводят к сложному взаимодействию потоков на днище судна и соответственно к перераспределению давления. Рекомендации по размерам и форме тоннелей для судов разных размеров отсутствуют.

Многие известные исследования скоростных судов с тоннелями относятся в первую очередь к многокорпусным судам – катамаранам и тримаранам.

В 2013 г. Morteza Ghassabzadeh и Hassan Ghassemi [1] с помощью программного комплекса CFD FLUENT 6.3 выполнили исследование гидродинамики скоростного тримарана при Fr от 0,5 до 4,0. В ходе моделирования изменялась форма тоннелей на корпусе тримарана. Результаты работы позволили определить форму тоннелей, соответствующую минимальному сопротивлению и необходимому эксплуатационному углу дифферента. Проведенное в дальнейшем сравнение с результатами модельных испытаний в опытовом бассейне [3] показало хорошую сходимость. Численному и экспериментальному исследованию возможности улучшения ГДХ маломерного глиссирующего тримарана, корпус которого включает два тоннеля прямоугольной формы, посвящена работа [3]. В статье описаны результаты моделирования гидродинамического взаимодействия тоннелей корпуса с носовой оконечностью различной формы в диапазоне чисел Фруда 2,1-4,72 для судна с шестью степенями свободы. Похожие исследования были выполнены в работах [4-7]. Оценке гидродинамики однокорпусного судна с двумя тоннелями в кормовой части посвящена работа Florin Pacuraru, Andreea Mandru и Adham Bekhit и Университета Галаца [8]. В работе оценивалось изменение сопротивления, смоченной поверхности, угла дифферента и осадки при увеличении скорости. Результаты численного моделирования показали, что тоннель в кормовой части ниша не оказывает существенного влияния в характеристики судна, а исключением зоны пониженного давления на днище, что может благоприятно влиять на работу движителя. В то же время исследование выполнено для скоростей от 10 до 40 узлов (18-75 км/ч) с большой дискретностью (8 точек), что не позволило в достаточной степени исследовать переходную область. Как показано в работах [9,10] даже незначительное изменение геометрии корпуса маломерного глиссирующего судна приводит к изменению его гидродинамических характеристик (ГДХ), что требует более детального моделирования как по диапазонам скоростей, так и по вариантам геометрических параметров. Следовательно, вопрос использования тоннельных обводов для повышения ГДХ скоростных маломерных судов остается актуальным. Поэтому целью настоящей работы является оценка изменения ГДХ скоростного маломерного судна с тоннелями разного размера.

1. Объект и методы исследования

Современным методом оценки ГДХ маломерных скоростных судов, позволяющим не только избежать масштабного эффекта за счет использования геометрии корпуса в натурную величину, но и получить дополнительную информацию о гидродинамике судна, например, распределение давления по корпусу, является вычислительная гидродинамика (CFD) [8]. Для исследования гидродинамики маломерного глиссирующего катера с тоннелем в корпусе использовался программный комплекс FineMarine™, результаты моделирования скоростных судов в котором, показали хорошее совпадение с модельными и натурными экспериментами [8,9]. В основе FineMarine™ лежит метод RANS для решения дифференциальных уравнений движения жидкости.

Исследовалась геометрия корпуса катера, для которой ранее были проведены модельные испытания (рис. 2). Тоннель располагался в кормовой части катера, диаметр тоннеля в процессе исследования изменялся (табл. 1). Поперечные и

продольные реданы на корпусе отсутствовали. Оценка изменения ГДХ проводилась сравнением с контрольным моделированием катера без тоннеля.

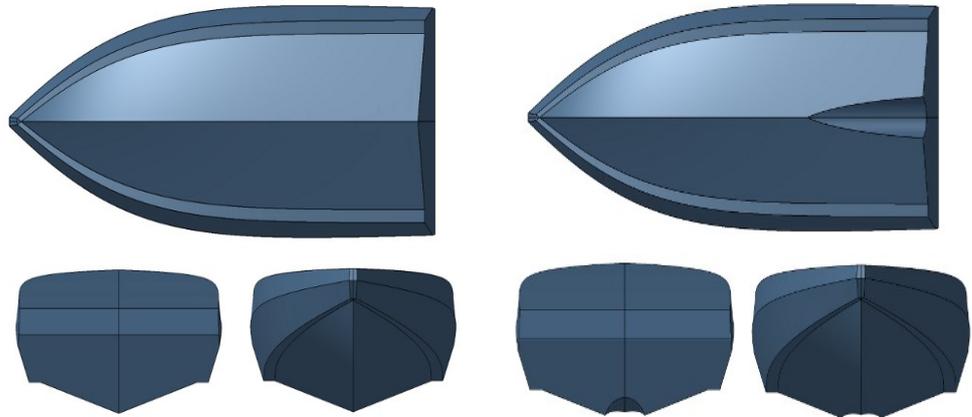


Рис. 2. Геометрия катера. а) исходный корпус; б) корпус с тоннелем D=420 мм.

Таблица 1

Характеристики моделируемых корпусов катера

1.	Диаметр тоннеля, мм	0	250	375	420
2.	Координаты ЦТ				
	x	1.77	1.77	1.77	1.77
	y	0	0	0	0
	z	0.884	0.71	0.69	0.712
3.	Масса, кг	1501	1501	1501	1501
4.	Матрица инерции, кг*м ²				
	I_{xx}	908.70	874.82	873.54	878.91
	I_{yy}	4755.027	3560.84	3558.26	3557.916
	I_{zz}	5231.52	4074.001	4072.657	4067.829
	$I_{yz} = I_{zy}$	0	0	0	0
	$I_{zx} = I_{xz}$	7.488	109.17	107.674	173.553
	$I_{yx} = I_{xy}$	0	0	0	0
5.	Начальный дифферент, град	0.0243	0.021	0.021	0.02
6.	Начальная осадка, м	0.2	0.2	0.2	0.2
7.	Скорость, м/с	10, 12, 14, 16, 18, 20, 22			
8.	Числа Фруда	2.090, 2.508, 2.925, 3.343, 3.761, 4.179, 4.597			

2. Численное моделирование гидродинамики глиссирующего катера с тоннелями

Параметры расчетной сетки выбирались на основании сравнения результатов численного моделирования с модельными испытаниями катера [9]. Использовались три варианта неструктурированной расчетной сетки различной плотности (рис.3). Как показали результаты оценки сеточной сходимости, наиболее близкие к модельным результаты показала расчетная сетка средней плотности (рис. 3) с разрешением пограничного слоя не более 10. Это позволило экстраполировать результаты численного моделирования для выработки общих подходов к построению сеток для маломерных судов аналогичных размеров, движущихся в аналогичных условиях. Поскольку при увеличении скорости доля трения в общем сопротивлении для скоростных судов снижается, то y^+ принимался равным не более 200 и соответствующее разрешение пограничного слоя сеткой было минимально

необходимым - 4-9 уровней разрешения. Параметры расчетных сеток для численного моделирования гидродинамики катера с тоннелями приведены в табл. 2.

Как правило, для более точного моделирования потоков в областях с существенными изменениями характера потока необходимо дополнительное измельчение сетки.

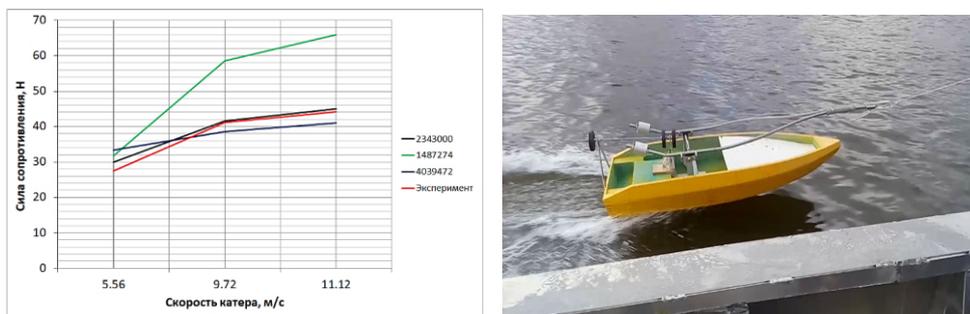


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования на разных сетках с результатами модельного эксперимента

Таблица 2

Параметры расчетных сеток

			Разрешение пограничного слоя
1.	Начальная сетка	40x8x16	
2.	Адаптация		
	палуба	4	-
	тоннель	6	9
	днище	6	9
	транец	8	4
	борт и скула	6	9
	свободная поверхность	8	-
3.	Локальная адаптация потока в корме (бокс 2x2x0,3м)	8	-
4.	Общее число ячеек		
	-исходный катер без тоннеля	2886372	
	- тоннель d=250мм	2785343	
	- тоннель d=375мм	2795729	
	- тоннель d=420мм	2854382	

Предполагалось, что при движении катера тоннель будет создавать дополнительное волнение и брызги, в кормовой части была произведено дополнительное измельчение сетки с помощью прямоугольной области размерами 2x2x0,3 м в районе свободной поверхности. Кроме того, дополнительное измельчение сетки было выполнено и в области самого тоннеля. Результирующая расчетная сетка приведена на рис. 4.

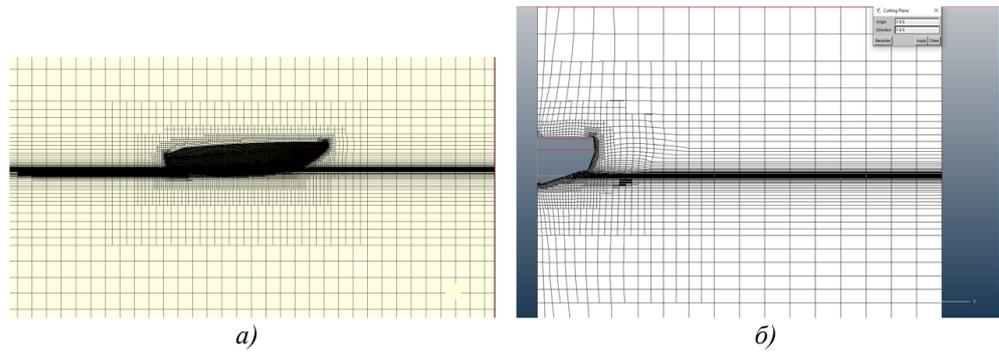


Рис. 4. Вид расчетной сетки: а) продольное сечение б) поперечное сечение

Для моделирования использовалась комбинация граничных условий для симметричного тела (рис. 5., табл. 3), подтвержденная исследованием [9]. Для более точного расчета гидродинамического следа за судном расчетная область была удлинена в корму на величину порядка 3,5 длин корпуса катера.

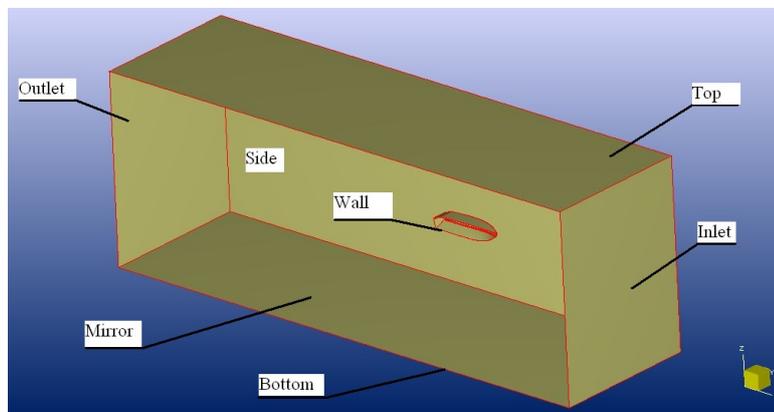


Рис. 5. Граничные условия на гранях расчетной области.

Таблица 3

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”
Палуба	“Slip” (zero shear stress)

Поскольку глиссирование маломерного судна сопровождается существенным изменением его посадки, в первую очередь осадки и дифферента, моделировалось судно с тремя степенями свободы: движение вперед, всплытие, вращение относительно поперечной оси. Масса катера во всех случаях была постоянной, судно изменяло свое положение под действием гидродинамических сил. Моделирование выполнялось в нестационарной постановке с использованием дополнительных моделей для корректировки давления на поверхности корпуса и компенсации изменения положения судна. Схема дискретизации по времени - 2 порядка назад.

Одним из условий адекватности результатов численного моделирования является выбор модели турбулентности. В настоящей работе на основании ранее выполненных исследований [9] использовалась «К- ω SST» модель турбулентности с пристеночными функциями.

3. Результаты и обсуждение

В результате моделирования определялись: значения силы сопротивления и подъемной силы, осадка и угол дифферента, площадь смоченной поверхности.

Необходимо отметить, что несмотря на ряд использованных дополнительных моделей для двух случаев (без тоннеля и с тоннелем диаметром 375 мм) при скорости 10 м/с выполнить моделирование не удалось. Как показал анализ результатов, в этих случаях происходило резкое увеличение угла дифферента катера и последующее его уменьшение за короткие промежутки времени в десятые и сотые доли секунды. Похожее поведение маломерных судов было неоднократно замечено в натуральных условиях, и относится к трудно моделируемым для обычных корабельных задач, физическим проблемам, требующим использования моделей удара о поверхность жидкости. В остальных случаях происходил выход судна на устойчивое глиссирование при $Fr > 2$, которое сопровождалось уменьшением угла дифферента и осадки (рис. 6 и рис.7). Графики изменения осадки (рис.6) показывают, что катер с тоннелями действительно обладает меньшей осадкой, по сравнению с обычными обводами. Наибольшее уменьшение осадки происходит при диаметре тоннеля $D=375$ мм на 33-37 процента от осадки катера без тоннеля в таких же условиях. Осадки при $D=250$ и $D=420$ мм друг от друга отличаются мало. Графики для $D=250$ мм содержат изломы при скоростях 16 и 18 м/с, причем излом графика изменения осадки также происходит у катера без тоннеля при скорости 20 м/с и может служить признаком начала неустойчивого режима движения (рикошетирования). Расчеты для данной точки выполнялись повторно и показали, что данный минимум на кривой для корпуса без тоннеля не является ошибкой численного моделирования и является характерным для катера без тоннеля. По всей видимости, в ряде случаев тоннель в корпусе маломерного судна может благоприятно влиять на гидродинамику маломерного судна за счет перераспределения давления по поверхности его корпуса и позволяет избегать опасных неустойчивых режимов движения.

Для всех вариантов корпусов судна дифферент при увеличении скорости уменьшается (рис.7) и для тоннельных обводов стабилизируется при скоростях 16-18 м/с, но увеличивается для корпуса без тоннеля. При скоростях меньших 10 м/с дифферент в корму достигает значений 5 и более градусов, что может свидетельствовать об излишнем смещении ЦТ судна в корму. Это требует пересмотра положения ЦТ по длине судна, в том числе, возможно, использования иной компоновки катера.

Численное моделирование показало, что одним из отрицательных последствий установки тоннелей в корпусе маломерного судна является существенное увеличение сопротивления (рис. 8-10). При всех диаметрах тоннелей рост сопротивления происходит быстрее, чем для катера без тоннеля. Величины полного сопротивления для тоннелей всех диаметров превышают сопротивление катера без тоннеля на величину от 14 до 36 процентов (рис. 8(a)). Минимальная величина относительного сопротивления наблюдается у катера с тоннелем диаметром 375 мм при скоростях больших 14 м/с. Данный факт по всей видимости объясняется по всей видимости меньшей, чем у остальных тоннелей площадью смоченной поверхности (рис. 10), причем необходимо отметить, что площадь смоченной поверхности катера без тоннеля меньше во всех случаях, чем у тоннельных обводов (рис.10). Если сравнивать скорость роста сопротивления, то на основании работы [9] можно отметить, что для аналогичного катера с гидролыжей, которая также позволяет уменьшить осадку, величина сопротивления возрастает значительно медленнее и на меньшую величину.

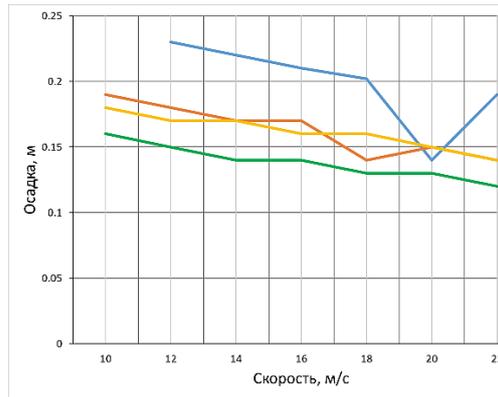


Рис. 6. Изменение осадки катера при увеличении скорости

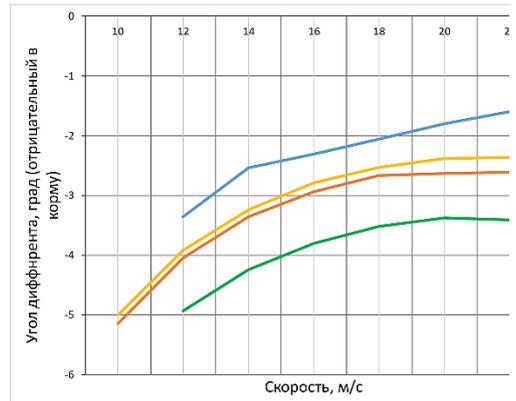
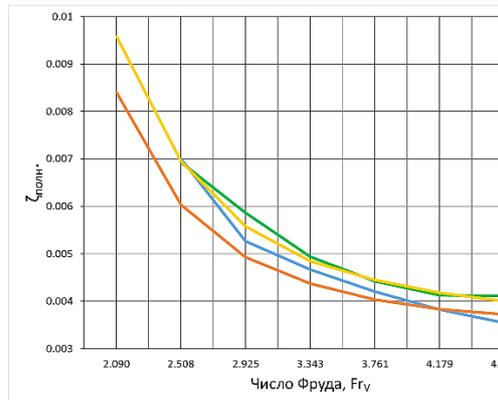
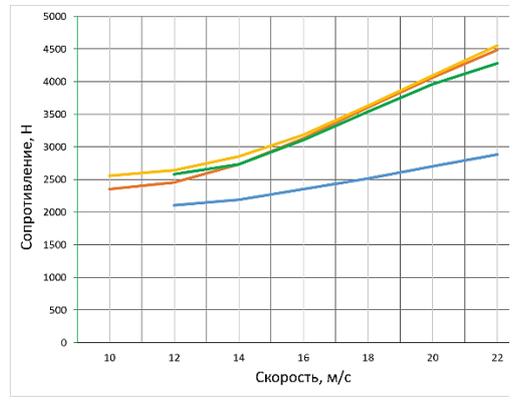


Рис. 7. Изменение угла дифферента катера



а)



б)

Рис. 8. Коэффициент полного сопротивления (а) и абсолютная величина сопротивления (б) катера с тоннелями различного диаметра

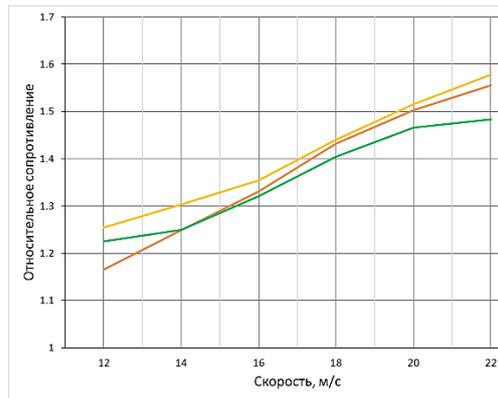


Рис. 9. Относительное сопротивление

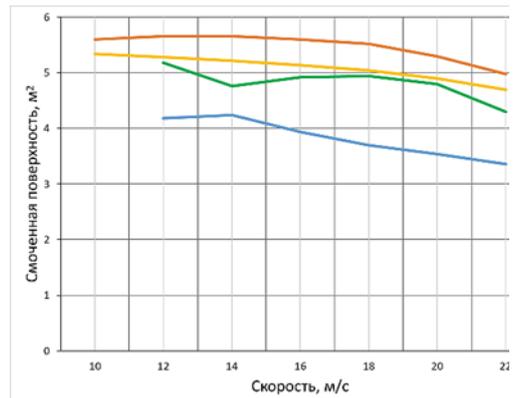


Рис. 10. Площадь смоченной поверхности катера с тоннелями разного диаметра

Рассмотрение распределения жидкости по корпусу судна показывает, что тоннель способствует «подсосу» воздуха под днище катера (рис. 11 и 12), который наиболее интенсивно происходит при $D=375$ мм. Подобные эффекты могут быть вызваны нефизическими ошибками численного моделирования, что потребовало использования дополнительных моделей компенсации струй вокруг корпуса. В ряде случаев уменьшение площади смоченной поверхности за счет появления воздуха под днищем полезно, поскольку приводит к снижению сопротивления, однако пузырьки воздуха могут приводить к возникновению кавитации гребного винта подвесного двигателя.

При глиссировании катера без тоннеля подъемная сила обеспечивается корпусом и в меньшей степени бортовыми реданами. Для катера с тоннелями смоченная поверхность распределена менее равномерно с существенным переходом давления на бортовые реданы (рис. 11-13). На кромках тоннелей наблюдаются области пониженного давления, которые могут приводить к возникновению отрывных течений.

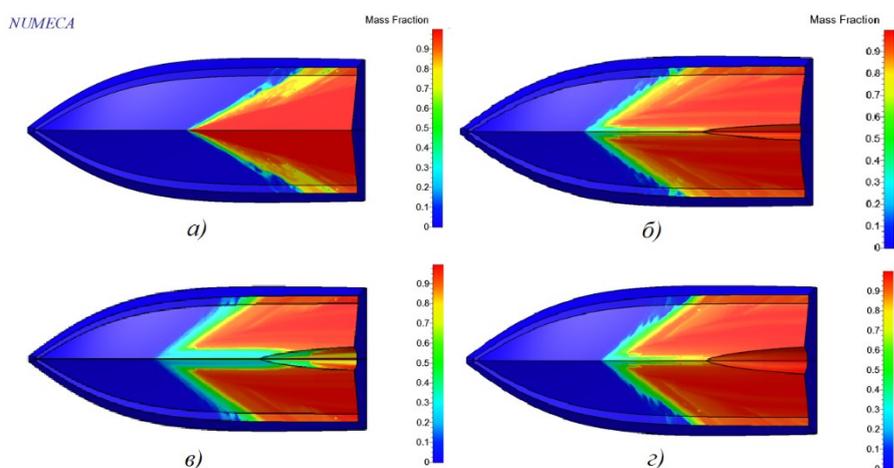


Рис. 11. Площадь смоченной поверхности катера при скорости $v = 22$ мм/с (вид на дно): а) $D=0$; б) $D=250$ мм; в) $D=375$ мм; г) $D=420$ мм.

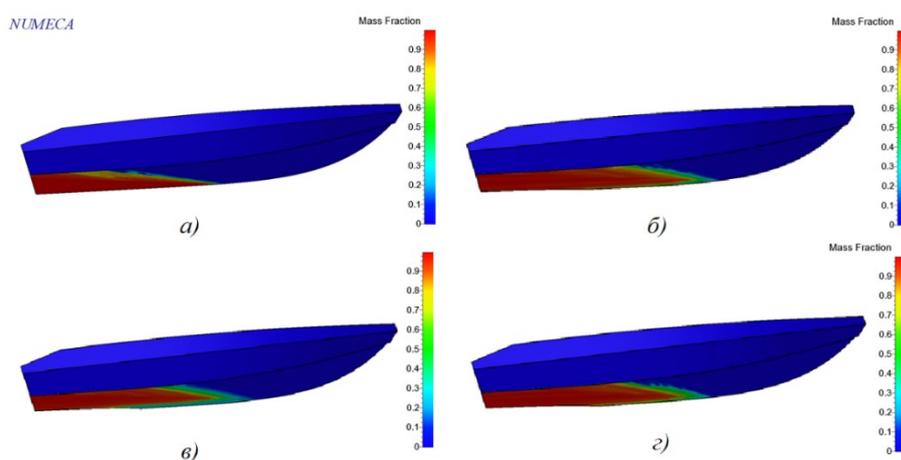


Рис. 12. Площадь смоченной поверхности катера при скорости $v = 22$ мм/с (вид на борт): а) $D=0$; б) $D=250$ мм; в) $D=375$ мм; г) $D=420$ мм.

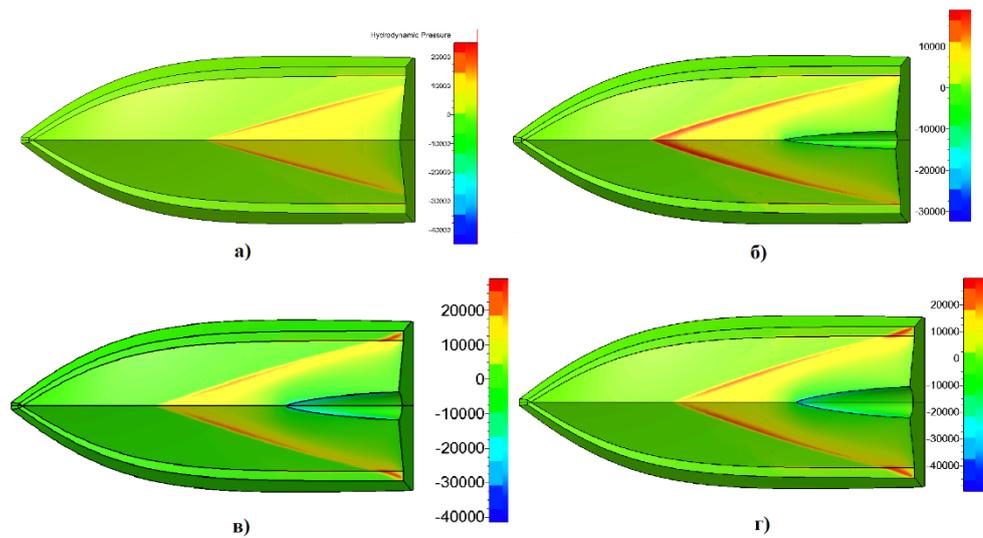


Рис. 13. Распределение гидродинамического давления по поверхности днища катера при скорости 22 м/с: а) D=0 мм; б) D=250 мм; в) D=375 мм; г) D=420 мм.

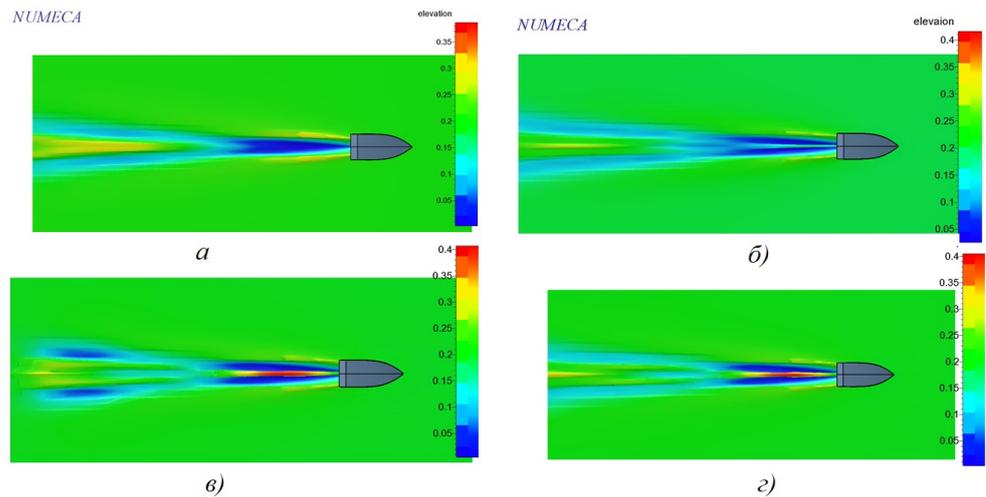


Рис. 14. Волновой след при движении катера со скоростью 22 м/с: а) D=0 мм; б) D=250 мм; в) D=375 мм; г) D=420 мм.

4. Заключение

В статье представлены результаты исследования влияния тоннелей в днище маломерного судна на его гидродинамику методами вычислительной гидродинамики. Использовались тоннели диаметров 250, 375 и 420 мм, результаты моделирования сравнивались с гидродинамическими характеристиками катера без тоннеля.

В результате численного моделирования были получены величины абсолютного сопротивления, изменения осадки и углов дифферента, площади смоченной поверхности.

Результаты численного моделирования показали, что тоннель вносит существенные изменения в гидродинамику маломерного судна, существенно увеличивая сопротивление, и в ряде случаев способствуя снижению осадки и уменьшению углов дифферента. Возможно положительное влияние тоннеля на

опасные режимы маломерных судов, такие как рикошетирующие. Кроме того, генерируемые тоннелями волны могут быть использованы для водных видов спорта.

С другой стороны, полученные результаты исследования показывают, что в общем случае простая интеграция тоннеля простой интеграцией в кормовую часть конкретного маломерного судна не всегда приводит к улучшению его гидродинамических характеристик. Требуется тщательная проработка обводов с учетом всех элементов, которые могут изменять гидродинамику корпуса маломерного судна, в том числе пересмотр компоновки такого судна.

Список литературы

1. Numerical Hydrodynamic of Multihull Tunnel Vessel. Morteza Ghassabzadeh, Hassan Ghassemi. Open Journal of Fluid Dynamics, 2013, 3, 198-204
<http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2013.33025> Published Online September 2013
(<http://www.scirp.org/journal/ojfd>)
2. Ghassabzadeh M, Ghassemi H, Determining of the hydrodynamic forces on the multi-hull tunnel vessel in steady motion, J of the Brazilian Society of Mech. Sci & Eng., 2014, 36(4), 697-708.
3. Numerical Prediction of Hydrodynamic Performance of Planing Trimaran with a Wave-Piercing Bow. Guangsheng Su, Hailong Shen, Yumin Su. Journal of Marine Science and Engineering. Volume 8 Issue 11 Page 897 ISSN 2077-1312
4. Roshan, Fatemeh, Abbas Dashtimanesh and Rasul Niazmand Bilandi. "Hydrodynamic characteristics of tunneled planing hulls in calm water." Brodogradnja, 71(1): 19-38.
5. Reza Yousefi, Rouzbeh Shafaghat and Mostafa Shakeri. "High-speed planing hull drag reduction using tunnels". Ocean Engineering, Volume 84 July 2014, Pages 54-60.
6. Hamid Kazemi Moghadam, Rouzbeh Shafaghat. "Numerical Investigation on the Effect of Tunnel Height on Drag Reduction in a High Speed Trimaran". INTERNATIONAL JOURNAL OF MARITIME TECHNOLOG, IJMT Vol.5 Winter 2016 (55-62)
7. Jiangming Ding, Jiabing Jiang. Tunnel flow of a planing trimaran and effects on resistance. Ocean Engineering, Volume 237, October 2021, 109458.
8. Pacurar, Florin, Andreea Mandru and Adham S. Bekhit. "CFD Study on Hydrodynamic Performances of a Planing Hull." Journal of Marine Science and Engineering (2022): n. pag. Sci. Eng. 2022, 10(10), 1523; <https://doi.org/10.3390/jmse10101523>
9. 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.
10. Исследование влияния формы кормовой оконечности маломерного судна на его гидродинамические характеристики / Е. Ю. Чебан, О. В. Мартемьянова, М. Ю. Поляшова, А. А. Мольков // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 76. – С. 75-88. – DOI 10.37890/jwt.vi76.388. – EDN SNYZTL.
11. Земсков, Е. А. Исследование влияния тоннельной кормы на гидродинамику маломерного судна / Е. А. Земсков, К. В. Егорченков, Е. Ю. Чебан // Транспорт. Горизонты развития : Труды 5-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород-Новосибирск-Владивосток, 20–23 мая 2025 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2025. – С. 78. – EDN GVXVNV.
12. Численные методы в механике жидкости: учебное пособие / Д.В. Никущенко. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГМТУ, 2025. – 144 с. ISBN 978-5-88303-720-6

References

1. Numerical Hydrodynamic of Multihull Tunnel Vessel. Morteza Ghassabzadeh, Hassan Ghassemi. Open Journal of Fluid Dynamics, 2013, 3, 198-204
<http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2013.33025> Published Online September 2013
(<http://www.scirp.org/journal/ojfd>)
2. Ghassabzadeh M, Ghassemi H, Determining of the hydrodynamic forces on the multi-hull tunnel vessel in steady motion, J of the Brazilian Society of Mech. Sci & Eng., 2014, 36(4), 697-708.

3. Numerical Prediction of Hydrodynamic Performance of Planing Trimaran with a Wave-Piercing Bow. Guangsheng Su, Hailong Shen, Yumin Su. Journal of Marine Science and Engineering. Volume 8 Issue 11 Pagination 897 ISSN 2077-1312
4. Roshan, Fatemeh, Abbas Dashtimanesh and Rasul Niazmand Bilandi. "Hydrodynamic characteristics of tunneled planing hulls in calm water." Brodogradnja, 71(1): 19-38.
5. Reza Yousefi, Rouzbeh Shafaghat and Mostafa Shakeri. "High-speed planing hull drag reduction using tunnels". Ocean Engineering, Volume 84 July 2014, Pages 54-60.
6. Hamid Kazemi Moghadam, Rouzbeh Shafaghat. "Numerical Investigation on the Effect of Tunnel Height on Drag Reduction in a High Speed Trimaran". INTERNATIONAL JOURNAL OF MARITIME TECHNOLOG, IJMT Vol.5 Winter 2016 (55-62)
7. Jiangming Ding, Jiabing Jiang. Tunnel flow of a planing trimaran and effects on resistance. Ocean Engineering, Volume 237, October 2021, 109458.
8. Pacuraru, Florin, Andreea Mandru and Adham S. Bekhit. "CFD Study on Hydrodynamic Performances of a Planing Hull." Journal of Marine Science and Engineering (2022): n. pag. ar. Sci. Eng. 2022, 10(10), 1523; <https://doi.org/10.3390/jmse10101523>
9. 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. – p. 59-69. – EDN ZULPNP.
10. Study of the influence of the vessel stern shape on its hydrodynamic characteristics / Cheban E.YU., Martmianova O.V., Polyashova M.YU., Mol'kov A.A. // Russian journal of water transport – 2023. – № 76. – p. 75-88. – DOI 10.37890/jwt.vi76.388. – EDN SNYZTL.
11. Zemskov E.A. Study of the influence of tunnel aft on the hydrodynamics of light craft / Zemskov E.A., Egorchenkov K.V., Cheban E.Yu. // Transport. Gorizonty razvitiya : Trudy 5-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma, Nizhnij Novgorod-Novosibirsk-Vladivostok, 20–23 maya 2025 goda. – Nizhnij Novgorod: Volzhskij gosudarstvennyj universitet vodnogo transporta, 2025. – S. 78
12. Chislennye metody v mekhanike zhidkosti: uchebnoe posobie / D.V. Nikushchenko. – Sankt-Peterburg: Izd-vo SPbGMTU, 2025. – 144 s. ISBN 978-5-88303-720-6

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

Никущенко Дмитрий Владимирович, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры Прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, 190121, e-mail: Ndmityr@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

Egor Yu. Cheban, Dr. Sci. (Eng), assistant 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

Dmitry V. Nikushchenko, professor, Dr.Sci., professor of department of applied mathematics and mathematical modelling, vice-rector for research, St. Petersburg state marine technical university, Lotsmanskaya st., 3, St. Petersburg 190121, e-mail: Ndmityr@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 Ulyanov Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russia, molkov@ipfran.ru

Статья поступила в редакцию 06.02.2026; принята к публикации 26.02.2026; опубликована онлайн 20.03.2026. Received 06.02.2026; published online 20.03.2026.