

DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(6)-12



Анализ полного сопротивления корпуса судна на различных скоростях хода

К.Д. Овчинников, ORCID: 0000-0001-8753-6243 <ovchinnikov_kd@mail.ru>

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
190121, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 3

Аннотация. В статье предложен метод для анализа полного сопротивления движению судна на скоростях хода, соответствующих числу Фруда по длине от 0,14 до 0,41. Основная идея метода состоит в разделении корпуса судна на составляющие поверхности. Данный подход позволяет рассчитать распределение силы сопротивления по длине судна. На основании полученных данных могут быть выбраны зоны для корректировки обводов, а также может быть выполнено более качественное сравнение нескольких вариантов корпуса. Перед примером применения предложенного метода были выполнены постановка задачи расчета сопротивления в программном комплексе OpenFOAM, валидация расчетной схемы и проверка сеточной сходимости. Для выполнения расчетов использовались стандартный решатель interDyMFoam и модель корпуса DTMB 5415. Для реализации предложенного метода корпус DTMB 5415 был разделен на 22 поверхности по длине судна. По результатам расчетов были получены кривые распределения силы сопротивления по длине корпуса для рассматриваемых скоростей хода. По результатам анализа кривых были разработаны два варианта обводов носовой оконечности корпуса DTMB 5415: без бульба и с обтекаемым бульбом. Оба варианта обводов обладают меньшим сопротивлением на всех скоростях хода по сравнению с базовым корпусом DTMB 5415. По результатам анализа кривых распределения силы сопротивления трех корпусов получено, что в районе средней и кормовой частей корпуса (~3/4 длины судна) распределенная сила сопротивления практически не зависит от скорости хода и обводов носовой оконечности. Носовая оконечность при этом играет первостепенную роль в формировании значения полного сопротивления корпуса.

Ключевые слова: численное моделирование; эксперимент; сопротивление; DTMB 5415; OpenFOAM

Для цитирования: Овчинников К.Д. Анализ полного сопротивления корпуса судна на различных скоростях хода. Труды ИСП РАН, том 31, вып. 6, 2019 г., стр. 195-202. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(6)-12

Analysis of total resistance for different ship speeds

K.D. Ovchinnikov ORCID: 0000-0001-8753-6243 <ovchinnikov_kd@mail.ru>

Saint-Petersburg State Marine Technical University,
3, Lotsmanskaya st., Saint-Petersburg, 190121, Russia

Abstract. The paper shows method for analyzing total resistance of ship which calculated on Froude numbers from 0.14 to 0.41. To this method the hull surface divides into its component surfaces to the ship length. This approach allows to calculate the distribution of resistance forces along the ship length. Based on this data hull zones for correcting can be selected, and a better comparison of several hull can be made. First of all mathematical scheme of total resistance calculating develops and validates in the OpenFOAM software. The standard solver interDyMFoam and DTMB 5415 hull data uses. Three grids uses for mesh convergence. To implement the proposed method the DTMB 5415 hull divides into 22 surfaces along the length. According to the results of numerical simulations the curves of distribution of resistance force along

195

the hull length for the different ship speeds obtain. Due to analysis of curves two versions of hull develops based on DTMB 5415 hull: without bulb and with streamlined bulb. Both hulls have lower resistance at all speeds compared to the DTMB 5415 base hull. Due to analysis of resistance force distribution curves of new hulls distributed resistance force on middle and stern parts of hull does not depend on ship speed and stem part lines. Stem part of hull has the most important influence on total resistance.

Keywords: numerical simulation; CFD; experiment; resistance; DTMB 5415; OpenFOAM

For citation: Ovchinnikov K.D. Analysis of total resistance for different ship speeds. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 31, issue 6, 2019. pp. 195-202 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(6)-12

1. Введение

При создании новых объектов морской техники особое внимание уделяют сопротивлению движению. Связано это в первую очередь с тем, что на преодоление сопротивления уходит наибольшая часть энергии, вырабатываемой энергетической установкой.

В рамках решения проектной задачи стараются выбрать такую форму корпуса, чтобы сопротивление движению было минимальным при удовлетворительных значениях прочих мореходных и эксплуатационных характеристик.

Применение программных продуктов вычислительной гидромеханики получает все большее распространение при проектировании судов. Это связано с относительной дешевизной отработки различных вариантов формы корпуса по сравнению с экспериментальными исследованиями.

В настоящей работе предложен и рассмотрено применение метода для анализа полного сопротивления судна, путем разделения корпуса по длине на составляющие поверхности. Численное моделирование реализуется в программном комплексе с открытым кодом OpenFOAM [1].

2. Математическая постановка задачи в программном комплексе OpenFOAM

Уравнение Навье-Стокса для несжимаемой жидкости определяется как система из уравнений сохранения импульса и уравнения неразрывности.

При высоких числах Рейнольдса вычисления прямым численным моделированием сопровождаются либо большими временными издержками, либо большими вычислительными мощностями, поэтому для моделирования турбулентных потоков обычно используются уравнения Навье-Стокса осредненные по времени, называемые уравнениями Рейнольдса. Эти уравнения получены из уравнений Навье-Стокса путем разбиения полей скорости давления на среднее значение и флуктуацию [2].

Для замыкания системы уравнений используется двухпараметрическая модель турбулентности k- ω SST [3].

Дискретизация фундаментальных уравнений в программном комплексе OpenFOAM выполняется с использованием схемы контрольного объема, свободная поверхность моделируется с помощью модифицированного метода объема жидкости.

Движение твердого тела, обладающего шестью степенями свободы, может быть описано динамическими уравнениями Эйлера [4]. В соответствии с описанной схемой решения поставленной задачи выбран стандартный решатель interDyMFoam.

Для создания расчетной области используются внутренние утилиты пакета OpenFOAM, такие как topoSet, refineMesh и snappyHexMesh. Размеры расчетной области определены в соответствии с [5].

3. Валидация расчетной схемы

Для выполнения контрольных расчетов выбран корпус DTMB 5415 [6, 7, 8].

196

Характеристики корпуса DTMB5415: длина между перпендикулярами $L_{pp} = 3,048$ м, ширина $B = 0,409$ м, осадка $T = 0,132$ м, водоизмещение $D = 83,5$ кг, аппликата центра тяжести $z_g = 0,163$ м, момент инерции относительно продольной оси $J_{44} = 1,92$ кг·м², момент инерции относительно поперечной оси $J_{55} = 48,5$ кг·м².

При выполнении валидации следует также провести проверку сеточной сходимости. Для этого было разработано несколько расчетных областей с осями симметрии по диаметральной плоскости корпуса судна со следующими характеристиками:

- «грубая» сетка: количество ячеек расчетной области ~936000, количество граней на поверхности корпуса ~13400, максимальный коэффициент пропорциональности ~80, максимальный коэффициент закрученности ячейки ~3,2, среднее значение неортогональности ~4,7;
- «средняя» сетка: количество ячеек расчетной области ~2867000, количество граней на поверхности корпуса ~25000, максимальный коэффициент пропорциональности ~53, максимальный коэффициент закрученности ячейки ~2,7, среднее значение неортогональности ~3,4;
- «хорошая» сетка: количество ячеек расчетной области ~7458000, количество граней на поверхности корпуса ~42000, максимальный коэффициент пропорциональности ~40, максимальный коэффициент закрученности ячейки ~2,4, среднее значение неортогональности ~2,7.

Расчеты выполнялись для трех скоростей хода:

- при скорости хода, соответствующей числу Фруда $Fr = 0,14$; при этой скорости хода преобладающее влияние в полном сопротивлении имеет сопротивление трения;
- при скорости хода, соответствующей числу Фруда $Fr = 0,28$; при этой скорости хода волновое сопротивление начинает оказывать все большую важную роль в полном сопротивлении, возникает первый горб волнового сопротивления;
- при скорости хода, соответствующей числу Фруда $Fr = 0,41$; при этой скорости хода волновое сопротивление играет преобладающую роль в полном сопротивлении, может возникать основной горб волнового сопротивления [9].

Численное моделирование выполнялось на вычислительном кластере ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Кластер включает в себя восемь узлов по 20 ядер. Один расчет выполнялся на одном узле. Время численного моделирования было фиксировано и равнялось 20 секундам. За это время значения сопротивления выравнивались, равно как и волнообразование вокруг корпуса модели.

Сравнение результатов численного моделирования обтекания моделей в пакете OpenFOAM и результатов экспериментального исследования представлено в табл. 1. В табл. 1 приведены следующие условные обозначения: Fr – число Фруда по длине; R_t – полное сопротивление, Н; ξ – абсолютная погрешность, Н; ζ – относительная погрешность, %; t – время расчета, ч.

Табл. 1. Сопротивление корпуса DTMB 5415 для различных расчетных областей
Table 1. DTMB 5415 resistance for different grids

	Эксперимент			«Грубая» сетка			«Средняя» сетка			«Хорошая» сетка		
Fr	0,14	0,28	0,41	0,14	0,28	0,41	0,14	0,28	0,41	0,14	0,28	0,41
R_t , Н	1,79	7,43	23,36	1,57	6,93	21,90	1,68	7,58	23,48	1,69	7,70	23,16
ξ , Н	-	-	-	-0,22	-0,50	-1,46	-0,11	0,15	0,12	-0,10	0,27	-0,20
ζ	-	-	-	-12%	-7%	-6%	-6%	2%	1%	-6%	4%	-1%
t , h	-	-	-	2,6	4,0	6,0	10,0	15,9	31,0	23,0	57,9	146,7

На основе анализа данных, представленных в табл. 1, сделан вывод о том, что удовлетворительные результаты получаются при расчетах на «средней» и «хорошей» сетках. При этом в проектной практике рекомендуется использование «средних» сеток, поскольку время выполнения численного моделирования при этом существенно меньше, нежели при использовании «хорошей» сетки.

Здесь также следует отметить один факт: при малых числах Фруда, когда основную роль в полном сопротивлении играет сопротивление трения, результаты численного моделирования имеют достаточно высокие значения относительной погрешности (до 6 %). При увеличении скорости хода, когда волновое сопротивление начинает играть большую роль, значения относительной погрешности падают.

4. Описание метода анализа полного сопротивления корпуса

При экспериментальном исследовании могут быть получены только полное сопротивление для всего корпуса. Численное моделирование также позволяет получить полное сопротивление, действующее на тело. Однако при численном моделировании есть возможность получить распределение силы сопротивления по длине судна – кривой распределения силы сопротивления.

При наличии кривой распределения силы сопротивления по длине корпуса судна имеется возможность для более точного анализа характеристик обтекания тела, а при сравнении нескольких корпусов – более точного задания функции оптимума.

Для получения кривой распределения сопротивления по длине судна корпус должен быть задан как набор поверхностей, полученных путем разделения по длине единого замкнутого тела на составляющие.

Эталонный расчет кривой распределения силы сопротивления по длине корпуса для модели DTMB 5415 выполнен при представленных ранее скоростях хода. Моделирование выполнялось на «хорошей» сетке.

При подготовке численного моделирования корпус был разделен на поверхности по 21 теоретическому шпангоуту – итоговый корпус имел 22 поверхности (рис. 1).

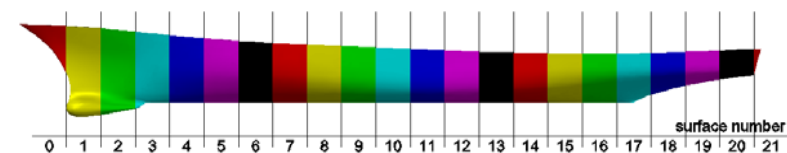


Рис. 1. Корпус DTMB 5415, разделенный на поверхности
Fig. 1. DTMB 5415 hull divided on surfaces

По результатам численного моделирования получены кривые распределения силы сопротивления по длине корпуса при различных скоростях хода, представленные на рис. 2. Если сложить все значения, представленные на рис. 2 для выбранной скорости хода, получатся значения полного сопротивления, представленные в табл. 1.

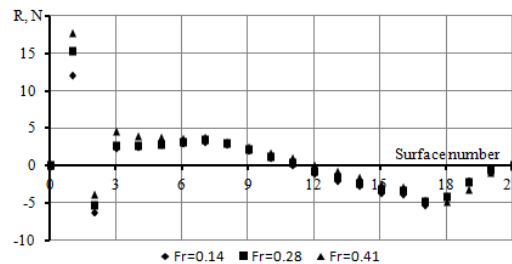


Рис. 2. Распределение силы сопротивления по длине корпуса DTMB 5415
Fig. 2. Distribution of resistance force on length of DTMB 5415 hull

На основе анализа данных, представленных на рис. 2, сделаны следующие выводы:

- кривая распределения силы сопротивления по длине корпуса имеет как положительные, так и отрицательные значения, что связано непосредственно с формой корпуса;
- наибольшие значения силы сопротивления возникают на носовой части бульба (поверхность № 1), и они тем больше, чем выше скорость хода;
- из-за обводов бульба наблюдается значительный скачок силы сопротивления в районе кормовой части бульба (поверхность № 2);
- от поверхности № 6 до самой кормы (~3/4 длины судна) значения распределенной силы сопротивления мало зависят от скорости хода, что может говорить о том, что основную роль в увеличении полного сопротивления при повышении скорости хода играет носовая оконечность;
- для уменьшения полного сопротивления корпуса судна необходимо произвести корректировку обводов носовой оконечности, в частности – бульба.

5. Анализ кривой распределения силы сопротивления для различных вариантов носовой оконечности

На базе корпуса DTMB 5415 (далее – корпус 1) были разработаны два варианта новых обводов носовой оконечности: корпус 2 – без бульба, и корпус 3 – с обтекаемым бульбом. Все три рассматриваемых корпуса представлены на рис. 3.

Расчеты для корпусов 2 и 3 выполнялись на «средней» сетке. Поскольку обводы корпусов изменились незначительно, характеристики расчетных областей также изменились незначительно.

В табл. 2 представлены результаты расчетов полного сопротивления рассматриваемых корпусов при различных скоростях хода.

Табл. 2. Полное сопротивление для различных корпусов
Table 2. Total resistance for different hulls

Число Фруда по длине Fr	Корпус 1	Корпус 2	Корпус 3
0,14	1,68	1,19	1,47
0,28	7,70	6,14	6,73
0,41	23,16	21,27	21,30

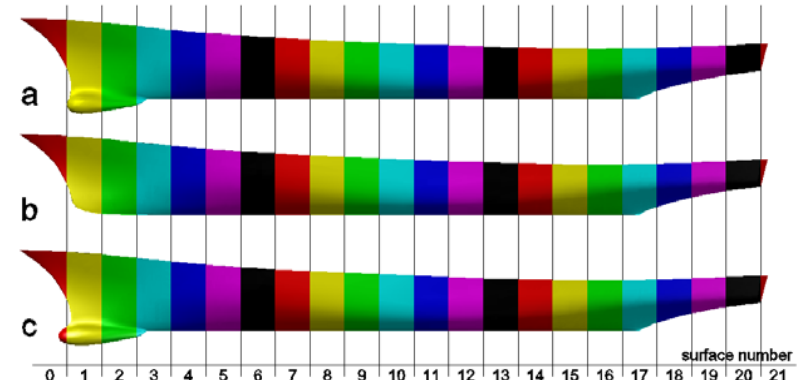


Рис. 3. Корпуса, разделенные на поверхности: а – Корпус 1 (DTMB 5415), б – Корпус 2, с – Корпус 3
Fig. 3. Hulls divided on surfaces: а – Hull 1 (DTMB 5415), б – Hull 2, с – Hull 3

В табл. 2 показано, что наименьшее сопротивление при всех скоростях хода имеет корпус 2 (без бульба). Однако здесь следует отметить одну проектную деталь: корпус DTMB 5415 имеет обводы военного корабля, которому бульб необходим для размещения гидроакустической станции. Корпус 3 имеет бульб, вместимость которого не меньше вместимости бульба корпуса 1, а сопротивление при всех рассматриваемых скоростях хода меньше.

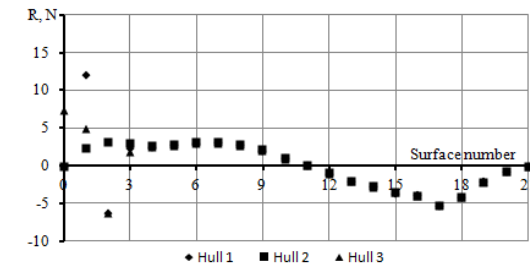


Рис. 4. Кривые распределения силы сопротивления по длине корпуса при скорости хода, соответствующей числу Фруда по длине $Fr = 0,14$
Fig. 4. Distribution of resistance force on hull surfaces for Froude number $Fr = 0,14$

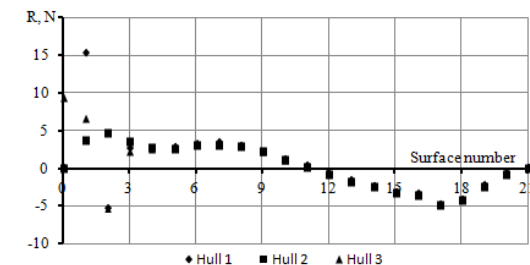


Рис. 5. Кривые распределения силы сопротивления по длине корпуса при скорости хода, соответствующей числу Фруда по длине $Fr = 0,28$
Fig. 5. Distribution of resistance force on hull surfaces for Froude number $Fr = 0,28$

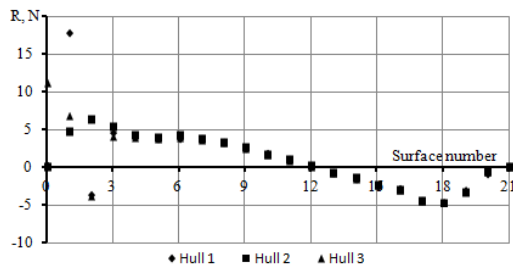


Рис. 6. Кривые распределения силы сопротивления по длине корпуса при скорости хода, соответствующей числу Фруда по длине $Fr = 0,41$

Fig. 6. Distribution of resistance force on hull surfaces for Froude number $Fr = 0,41$

На основе анализа данных, представленных на рис. 4 – 6, сделаны следующие выводы:

- при отсутствии бульба кривая распределения силы сопротивления по длине корпуса не имеет резких скачков, что благоприятно влияет на значение полного сопротивления;
- изменение обводов бульба привело к перераспределению силы сопротивления, что благоприятно сказалось на значении полного сопротивления;
- несмотря на изменение обводов бульба, отрицательные значения на поверхности № 3 практически не изменились;
- от поверхности № 6 до самой кормы ($\sim 3/4$ длины судна) значения распределенной силы сопротивления не зависят от формы носовой оконечности.

6. Заключение

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

Программный комплекс OpenFOAM рекомендуется для расчета сопротивления движению судна с использованием как минимум «средних» сеток. При этом погрешность расчета падает с увеличением скорости хода, что связано с уменьшением влияния сопротивления трения на значение полного сопротивления.

Кривая распределения силы сопротивления по длине судна имеет ярко выраженные скачки в носовой части судна при наличии бульба. При этом, начиная со средней части корпуса и заканчивая кормой ($\sim 3/4$ длины судна), значения распределенной силы сопротивления практически не зависят от скорости хода.

Изменения обводов носовой оконечности судна не оказывают влияния на значения распределенной силы сопротивления в средней и кормовой частях корпуса ($\sim 3/4$ длины судна). Носовая оконечность играет первостепенную роль в формировании значения полного сопротивления корпуса.

Дальнейшие направления работы включают, разработку численной схемы для оценки значений распределенной силы сопротивления носовой оконечности (или другой части) судна при серьезных уменьшениях временных затрат для решения задачи оптимизации формы корпуса с точки зрения ходовых качеств, а также разработку метода оценки влияния различных составляющих сопротивления (сопротивления трения, сопротивлении формы и волнового сопротивления) на значение полного сопротивления корпуса.

Список литературы / References

- [1] The OpenFOAM Foundation. Available at: <https://openfoam.org/>, accessed 01.09.2019.
- [2] Henry Peter Piehl. Ship Roll Damping Analysis. Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik, der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften Dr.-Ing. April 2016.
- [3] Menter, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal, vol. 32, no. 8, 1994, pp. 1598-1605.
- [4] Овчинников К.Д., Тряскин Н.В., Ткаченко И.В. Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении. Морские интеллектуальные технологии, № 2, том 1 2015 г., стр. 14-18 / Ovchinnikov K.D., Tryaskin N.V., Tkachenko I.V. Numerical simulation of motions of semisubmersible rig in regular waves. Marine intellectual technologies, № 2, vol. 1, 2015, pp. 14-18 (in Russian).
- [5] Ovchinnikov K.D. Numerical simulation of motions of ship with moonpool in head waves. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 30, issue 5, 2018. pp. 235-248. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-30(5)-14.
- [6] Gui L., Longo J., and Stern F. Biases of PIV Measurement of Turbulent Flow and the Masked Correlation-Based Interrogation. Experiments in Fluids, vol. 30, 2001, pp. 27-35.
- [7] Gui L., Longo J., and Stern F. Towing Tank PIV Measurement System, Data and Uncertainty Assessment for DTMB Model 5512. Experiments in Fluids, vol. 31, 2001, pp. 336-346.
- [8] Longo J. and Stern F. Uncertainty Assessment for Towing Tank Tests with Example for Surface Combatant DTMB Model 5415. Journal of Ship Research, vol. 49, no. 1, 2005, pg. 55-68.
- [9] Справочник по теории корабля: в трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Под ред. Я.И. Войткунского. Л., Судостроение, 1985, 785 стр. / Ship theory handbook. Ed. by Y.I. Voitkounski. In 3 volumes. Vol. 1. Hydromechanics, Resistance of Ship, Ship Propulsion Devices. Leningrad. Sudostroenie, 1985. 768 p. (in Russian).

Информация об авторах / Information about authors

Кирилл Дмитриевич ОВЧИННИКОВ – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры проектирования судов Санкт-Петербургского государственного морского технического университета с 2015 года. Сфера научных интересов: проектирование судов, теория корабля, методы вычислительной гидродинамики.

Kirill D. OVCHINNIKOV – PhD, senior lecturer of ship design department in Saint-Petersburg State Marine Technical University since 2015. Research interests: ship design, ship theory, computation fluid mechanics.