



## МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 656.6; 629.5.083.7

### ОЦЕНКА ХОДКОСТИ СУДНА НА ОТКРЫТОЙ ВОДЕ ПОСЛЕ ДЕМОНТАЖА НОСОВОГО БУЛЬБА

**А.А. Петров**, канд. техн. наук, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: Petrov25@cniimf.ru

**А.А. Рябова**, АО «ЦИФРА», Санкт-Петербург, e-mail: alexandra.ryabova@multiphysics.ru

**Ф.С. Рябов**, АО «КАДФЕМ Си-Ай-Эс», Санкт-Петербург, e-mail: philipp.ryabov@cadfem-cis.ru

В последнее время среди судовладельцев, эксплуатирующих суда ледовых классов Arc4 — Arc5 или IA — IA Super на Северном морском пути, стали востребованными проекты по демонтажу носового бульба, целью которых является обеспечение возможности ледокольной проводки «на усах» и, как следствие, круглогодичной эксплуатации в Арктике. Поскольку основное назначение бульба — снижение волнового сопротивления на открытой воде, после подобной модернизации (при сохранении пропульсивного комплекса и размеров судна) неизбежно ухудшение ходкости и, как следствие, увеличение затрат на топливо. С помощью CFD-анализа можно достаточно быстро и с высокой точностью оценить изменение сопротивления движению судна, а при наличии достоверных данных о расходе топлива до модернизации — спрогнозировать увеличение топливных расходов. В статье приведен пример реализованного проекта по демонтажу бульба и соответствующий CFD-анализ изменения сопротивления движению судна. Предложенный подход может быть использован для практических оценок ходкости судна на этапе разработки проекта модернизации с целью долгосрочного планирования экономической деятельности судоходной компании.

**Ключевые слова:** бульб, демонтаж бульба, модернизация судна, буксировка «на усах», ходкость, CFD-анализ, сопротивление движению судна

### ASSESSMENT OF THE PROPULSION QUALITIES OF A SHIP IN THE OPEN WATER AFTER DISMANTLING THE BULBOUS BOW

**A.A. Petrov**, PhD, JSC CNIIMF, St. Petersburg, e-mail: Petrov25@cniimf.ru

**A.A. Ryabova**, JSC CIFRA, St. Petersburg, e-mail: alexandra.ryabova@multiphysics.ru

**Ph.S. Ryabov**, JSC CADFEM CIS, St. Petersburg, e-mail: philipp.ryabov@cadfem-cis.ru

Recently, among shipowners operating Arc4 — Arc5 or IA — IA Super ice-class ships on the Northern Sea Route, projects for dismantling the bow bulb have seen increase in demand. The purpose of such projects is to ensure the possibility of icebreaker close towing and, as a result, year-round operation in the Arctic. Since the main function of the bulb is to reduce the wave resistance in open water, after such a modernization (while maintaining the propulsion system and ship dimensions), a deterioration in the speed and, as a consequence, an increase in fuel costs is inevitable. With the help of CFD-analysis, it is possible to estimate the change in resistance to the movement of the ship rather quickly and with high accuracy, and if there are reliable data on fuel consumption before modernization, it is possible to predict an increase in fuel consumption. The article provides an example of a completed project for dismantling the bulb and the corresponding CFD-analysis of the resistance to the movement of the ship. The proposed approach can be used for practical assessment of the ship's propulsion qualities at the stage of developing a modernization project for the purpose of long-term planning of the economic activity of a shipping company.

**Keywords:** bulb, bulb dismantling, ship modernization, close towing, propulsion qualities, CFD analysis, resistance to the movement of the ship

## ВВЕДЕНИЕ

Важным условием развития российской Арктики является надежная транспортировка грузов. Порт Сабетта — крупнейший порт из всех действующих на Северном морском пути, доступность которого должна быть обеспечена круглогодично. Порт расположен в северной части Обской губы, где суровые погодные условия вносят коррективы в интенсивность судоходства.

Несмотря на строительство и постепенный ввод в эксплуатацию новых судов высоких арктических классов, способных самостоятельно двигаться во льдах толщиной более 1 м, в ближнесрочной перспективе ощутимая часть привлекаемых к работе в этом регионе грузовых судов будет иметь ледовые классы не выше **Arc5** или **IA Super** по финско-шведской классификации. В зимне-весенний период при тяжелых ледовых условиях в акватории Обской губы таким судам разрешен проход только в случае их проводки ледоколом методом буксировки вплотную — «на усах».

Однако многие суда, изначально не предназначенные для такой работы, имеют бульбообразную форму носовой оконечности, что делает проводку ледоколом вплотную труднореализуемой или вовсе невозможной. В связи с этим перед судовладельцами встает вопрос о целесообразности демонтажа носового бульба и экономических последствиях такой модернизации, ведь известно, что при различных соотношениях числа Фруда и характеристик бульба, наличие последнего позволяет уменьшить волновое сопротивление при движении на открытой воде на 5 — 15 % [1, с. 146 — 147]. То есть после демонтажа бульба, при сохранении пропульсивного комплекса и размерений судна, стоит ожидать соответствующего увеличения сопротивления движению и, как следствие, повышения расходов на топливо.

Для долгосрочного планирования экономической деятельности судоходной компании использование грубых оценок может привести как к завышению, так и к занижению издержек, вызванных изменением ходкости судна. Поэтому целесообразно еще на этапе разработки проекта модернизации носовой оконечности уделить этому вопросу особое внимание.

Для оперативного решения такой задачи предлагается использовать методы вычислительной гидродинамики (также CFD от англ. computational fluid dynamics), позволяющие без существенных затрат на проведение натурных испытаний с высокой точностью определить полное сопротивление движению судна. Методы CFD широко используются для решения задач оптимизации формы корпуса при проектировании судов, например, [2 — 5], однако в настоящей работе показана эффективность и практичность CFD применительно к модернизации эксплуатирующегося судна при решении актуальной задачи по демонтажу носового бульба.

## 1. ПРОЕКТ МОДЕРНИЗАЦИИ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ (ДЕМОНТАЖ БУЛЬБА)

В 2020 году в АО «ЦНИИМФ» по заказу ООО «Севнор Менеджмент» был выполнен проект модернизации носовой оконечности т/х «Ямал Беркут» (бывш. "BBC Rhine", IMO 9368338), включавший разработку новой формы носовой оконечности и усиление корпуса для получения ледового класса **Arc4** (судно имело с постройки ледовый класс **IA** по финско-шведской классификации). При определении новой формы носовой оконечности учитывались следующие факторы:

- формы кормовых кринолинов атомных ледоколов ФГУП «Атомфлот» (для обеспечения безопасной проводки «на усах»);
- требования 3.10 части II «Корпус» Правил классификации и постройки морских судов [6];
- необходимость сохранить расположение подруливающего устройства и якорных ниш (см. рис. 1).

Исходная и новая формы носовой оконечности представлены на рис. 1 — 2, основные размерения судна приведены в табл. 1. Исходные чертежи и информация о судне публикуются с согласия судовладельца — ООО «Севнор Менеджмент».

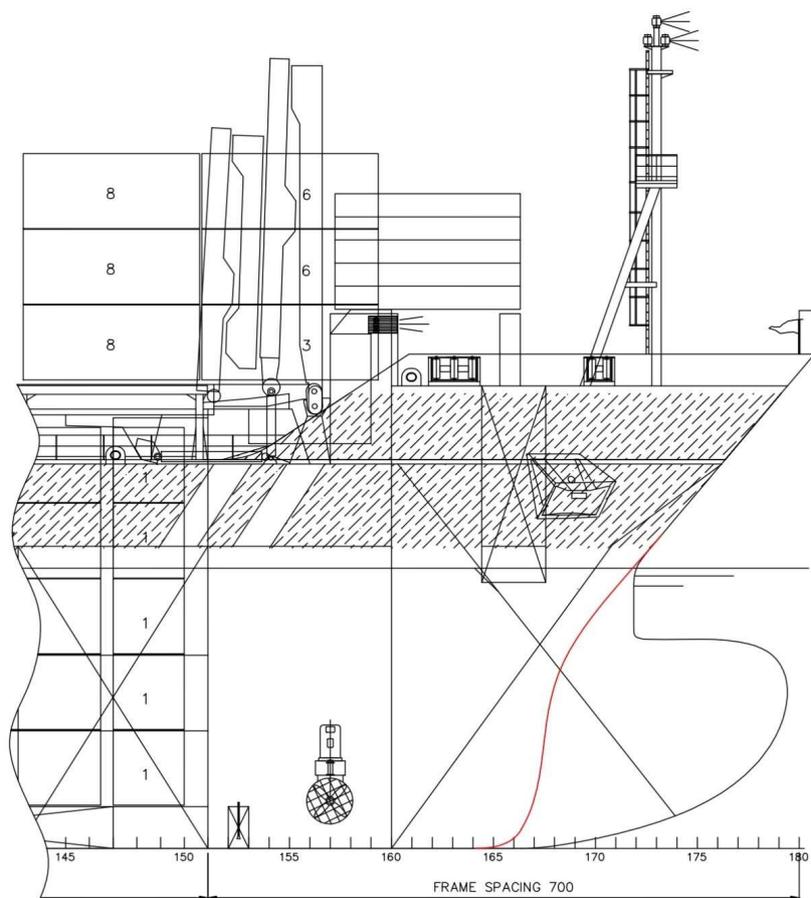


Рис. 1 Фрагмент схемы общего расположения (красный цвет — новая линия форштевня)

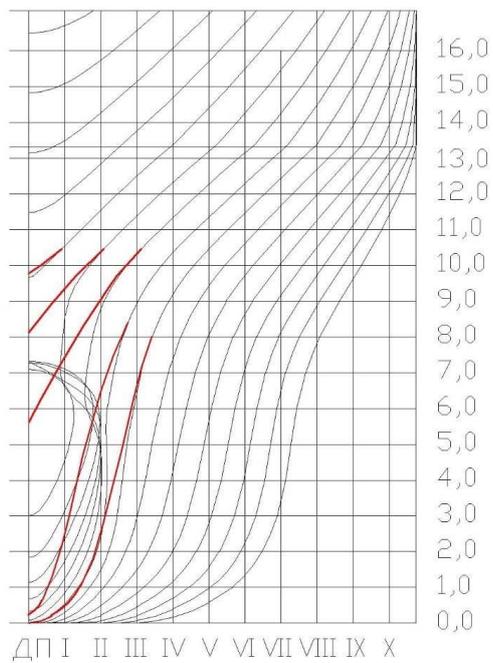


Рис. 2 Практические шпангоуты в носовой оконечности (красный цвет — новая форма шпангоутов)

Таблица 1

## Основные размеры судна

Длина между перпендикулярами $L_{pp}$ , м	132,00
Ширина $B$ , м	21,50
Высота борта $H$ , м	13,30
Осадка по ЛГВЛ $d$ , м	9,69
Водоизмещение исходное, $\Delta_0$ , т (при $d=9,69$ м)	22882
Водоизмещение новое, $\Delta$ , т (при $d=9,69$ м)	22721

В результате модернизации изменение коэффициента общей полноты составило  $\Delta C_b = -0,002$ , изменение веса судна порожнем  $\Delta P = -19$  т. На рис. 3 показаны этапы реализации проекта на судоремонтном предприятии (фотографии предоставлены ООО «Севнор Менеджмент»).



а)



б)



в)

Рис. 3 Реализация проекта:  
а) — постановка судна в док; б) — демонтаж бульба; в) — результат модернизации

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ СУДНА

Ходкость судна — способность перемещаться с заданной скоростью при наиболее эффективном использовании мощности силовой установки — характеризуется двумя основными элементами: сопротивлением движению судна и эффективностью его движителей [7]. Учитывая то, что в рассматриваемой задаче гребной винт и СЭУ не изменяются, главным критерием для оценки ходкости судна будет выступать полное сопротивление  $R$ , определяемое как

$$R = R_f + R_r = R_f + R_{vp} + R_w, \quad (1)$$

где  $R_f$  — сопротивление трения;  
 $R_r$  — сопротивление давления (остаточное сопротивление);  
 $R_{vp}$  — сопротивление формы;  
 $R_w$  — волновое сопротивление.

Для определения сопротивления движению судна на открытой воде использовано программное обеспечение (далее — ПО) ANSYS Fluent, реализующее метод CFD. Одним из преимуществ данного ПО является возможность определить отдельно составляющие  $R_f$  и  $R_r$  полного сопротивления, что косвенно позволит оценить корректность расчета применительно к рассматриваемой задаче — поскольку наличие бульба в большей степени влияет на волновое сопротивление, разница между составляющими  $R_r$  для двух моделей должна быть значительней относительно разницы между  $R_f$ .

Расчетные 3-D модели судов приведены на рис. 4.

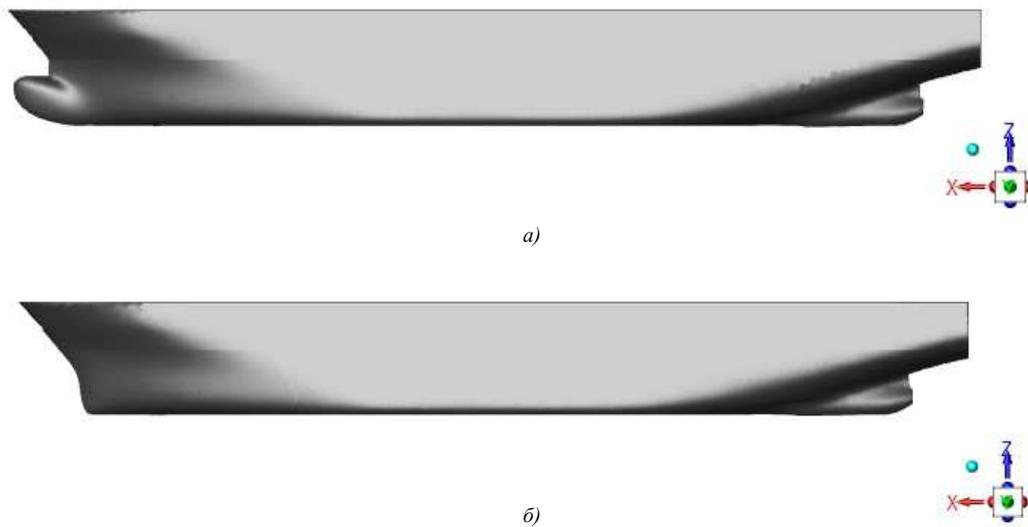


Рис. 4 3-D модели судна  
 а) — судно с бульбом; б) — судно после модернизации.

Моделирование границы раздела фаз осуществлялось в ANSYS Fluent с помощью математической модели осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса и неразрывности с методом Volume of Fluid, описанной, например, в [8]. Расчетная область была разделена на две части: надводную и подводную. Для измельчения сеточной модели на границе раздела фаз во fluent meshing применялась опция surface of influence (см. рис. 5).

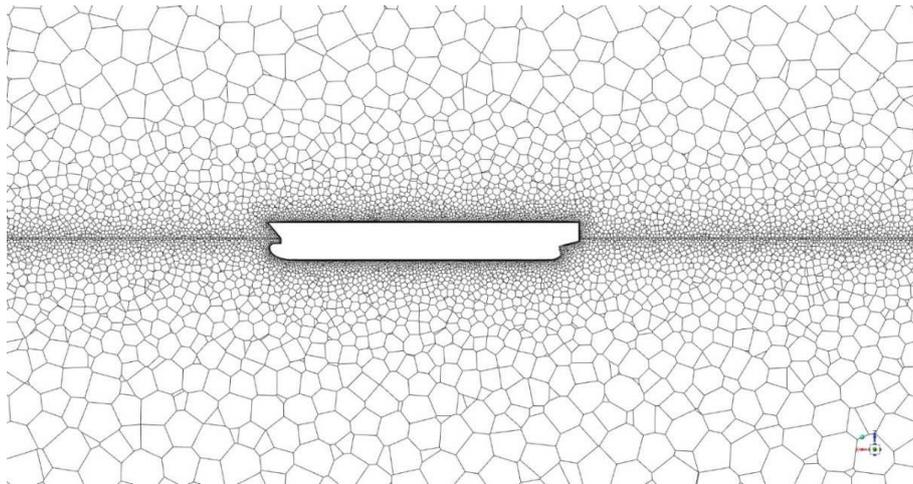


Рис. 5 Фрагмент сеточной модели в плоскости симметрии судна

Решение задачи осуществлялось с использованием принципа обращенного движения: рассматривалось натекание с постоянными скоростями на неподвижный корпус судна воздушной и водной сред в направлении, противоположном оси  $X$  глобальной системы координат (СК), то есть по нормали к входным границам. При таком подходе расчетная область и сеточная структура остаются неподвижными, что существенно экономит вычислительные ресурсы. Рассматривалось 4 скорости натекания: 6, 10, 13 и 15 узлов.

Размеры расчетной области выбирались из соображения минимизации возмущений на ее границах и приведены на рис. 6. Количество ячеек в сеточной модели составляло порядка 2 млн.

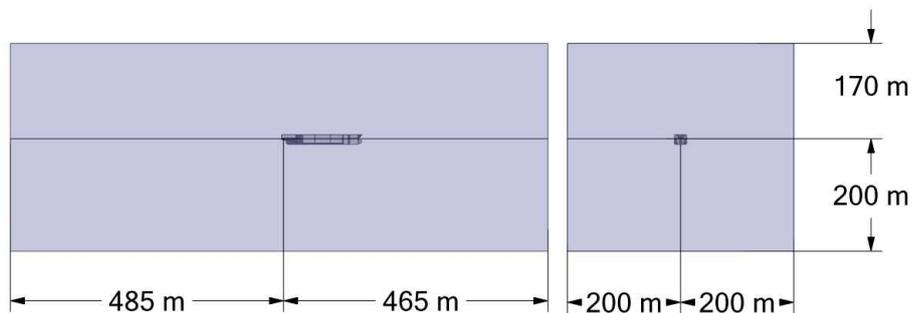


Рис. 6 Габаритные размеры расчетной области

Активация опции Open Channel Flow в настройках модели Volume of Fluid позволяет задать на входных и выходных границах значение уровня дна, а также начальное положение уровня свободной поверхности (в данном случае  $Z = 0$  м глобальной СК, что соответствует значению осадки судна, приведенного в табл. 1). Таким образом после инициализации расчета пользователь получает плоскую начальную конфигурацию свободной поверхности, которая автоматически перестраивается в ходе расчета, а также начальное распределение гидростатического давления в соответствии с заданными значениями уровней дна и свободной поверхности акватории [9].

Верхняя, нижняя и боковые границы домена имеют граничное условие стенки с проскальзыванием, то есть нормальные компоненты вектора скорости и градиентов всех величин на этих границах равны нулю. На поверхностях судна задается граничное условие стенки без проскальзывания, которое обычно описывается как условие прилипания и непроницаемости (касательная и нормальная компоненты скорости на границе равны нулю).

Расчет осуществлялся в неявной псевдонестационарной постановке с шагом по времени 0,5 с со схемой решателя Pressure-Based Coupled и опцией Coupled with Volume Fraction. При расчете свободной поверхности использовалась схема compressive. В качестве модели турбулентности была выбрана  $y^+$  — независимая модель  $k-\omega$  SST (Shear Stress Transport). Число Куранта в процессе расчета принималось равным 5.

При таких настройках установившееся решение достигалось примерно за 20 — 30 тыс. итераций. При этом выполнялись необходимые критерии сходимости: достижение заданного уровня невязок, неизменного значения полного сопротивления судна (отклонение от среднего значения в пределах 1 — 3 %), стремление значения дисбаланса по массе к нулевой отметке.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ CFD-АНАЛИЗА

Результаты CFD анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета сопротивления движению судна

$V$ , уз	$Re$	$Fr$	Корпус с бульбом			Корпус без бульба			Разница в процентах		
			$R_r^{bulb}$ , Н	$R_f^{bulb}$ , Н	$R^{bulb}$ , Н	$R_r^{debulb}$ , Н	$R_f^{debulb}$ , Н	$R^{debulb}$ , Н	$ \Delta R_r $ , %	$ \Delta R_f $ , %	$ \Delta R $ , %
6	4,5E+08	0,083	39987	42166	82153	43434	41746	85180	7,94	1,01	3,55
10	7,4E+08	0,138	67509	109566	177076	75250	109496	184746	10,29	0,06	4,15
13	9,7E+08	0,179	124715	178101	302817	149468	177438	326906	16,56	0,37	7,37
15	1,1E+09	0,206	209657	233924	443580	260308	233211	493519	19,46	0,31	10,12

На рис. 7 представлены кривые зависимости полного сопротивления от скорости для двух вариантов исполнения корпуса.

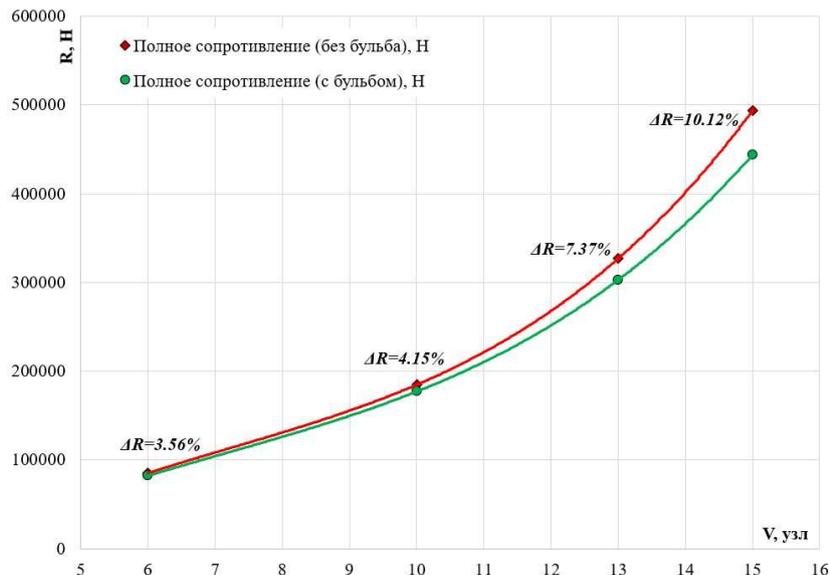


Рис. 7 Зависимость величины полного сопротивления от скорости судна

Видно, что с увеличением скорости судна увеличивается и полное его сопротивление, причем зависимость эта в обоих случаях имеет нелинейный характер. Это объясняется тем, что с ростом скорости волнообразование становится все более интенсивным, соответственно возрастает сопротивление давления и его роль в общем сопротивлении.

Движущееся судно приводит в движение значительные массы воды, наиболее высокие волны образуются в районе носовой оконечности, при этом часть из них расходится в стороны, образуя систему расходящихся волн, располагающихся симметрично по левому и правому бортам. Вторая система волн образуется вблизи кормовой оконечности, но высота этих волн обычно меньше, чем в носовой части.

Кроме того, по бортам судна можно заметить профиль поперечных волн. От высоты и профиля носовой волны зависит распределение гидродинамического давления вблизи форштевня, поэтому изменяя носовые обводы корпуса можно в некоторой степени влиять на носовую волновую систему, тем самым уменьшая волновое сопротивление.

На рис. 8 изображена форма свободной поверхности при движении судна с бульбом. Качественно картина для судна без бульба не меняется, однако наблюдается некоторое увеличение высоты носовой и поперечных волн (в пределах 1 — 2 %).

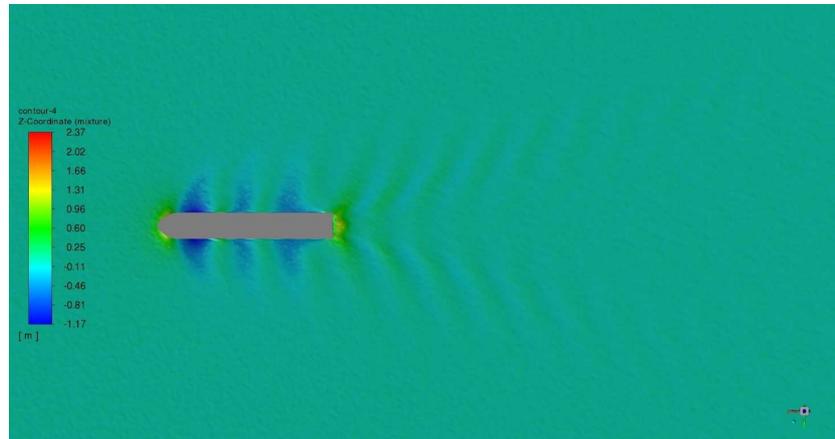


Рис. 8 Форма свободной поверхности при  $V=15$  узлов (судно с бульбом)

На рис. 9 представлено распределение коэффициента давления по подводной части корпусов судна с бульбом и судна после модернизации. Коэффициент давления  $\bar{p}$  — это безразмерная величина, равная разности местного давления и давления в невозмущенном потоке, отнесенная к скоростному напору невозмущенного потока:

$$\bar{p} = \frac{p - p_{\infty}}{\rho V_{\infty}^2 / 2}, \quad (2)$$

где  $p$  — местное давление (давление в выбранной точке на теле);  
 $p_{\infty}$  — давление в невозмущенном потоке;  
 $\rho$  — плотность среды;  
 $V_{\infty}$  — скорость невозмущенного потока.

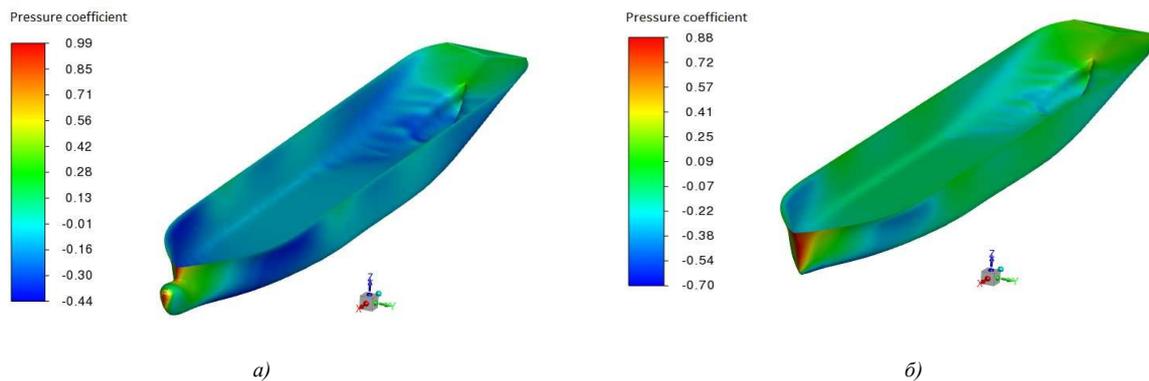


Рис. 9 Распределение коэффициента давления на подводной части судна при  $V=15$  узлов:  
 а) — судно с бульбом; б) — судно после модернизации

В результате местного повышения давления в передней части бульба, сбегающий с него поток подходит к корпусу судна с уже в некоторой степени пониженным давлением, что в свою очередь и приводит к снижению сопротивления давления для рассматриваемого корпуса.

Графически распределение коэффициента давления вдоль обвода рассматриваемых подводных частей корпусов в плоскости их симметрии при движении судов со скоростью 15 узлов представлено на рис. 10.



Рис. 10 Распределение коэффициента давления по обводу погруженной в воду части корпусов в плоскости симметрии ( $V=15$  узлов)

Результаты расчета как качественно, так и количественно соответствуют обобщенным теоретическим и статистическим исследованиям, при этом разница между вязкостными сопротивлениями  $|\Delta R_f| = 0,06 \div 1,01 \%$  существенно меньше разницы между остаточными сопротивлениями  $|\Delta R_k| = 7,94 \div 19,46 \%$ , что подтверждает корректность численного моделирования. Нужно отметить, что для корпуса с бульбом вклад в сопротивление со стороны вязкостных сил несколько больше, чем для модифицированного судна, что обусловлено увеличением в первом случае площади смоченной поверхности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При демонтаже носового бульба неизбежно изменение ходовых качеств судна на открытой воде, и для долгосрочного планирования экономической деятельности судоходной компании может быть актуальным вопрос количественной оценки этого изменения. Благодаря CFD-анализу можно достаточно быстро и с высокой точностью оценить изменение сопротивления движению судна, которое при одних и тех же характеристиках винто-рулевого комплекса, будет линейно влиять на расход топлива. Полученные в результате расчета данные могут быть аппроксимированы и использованы для выполнения оценок на любых скоростях.

В расчете были приняты допущения:

- тихая вода;
- метод обращенного движения;

● неучет наличия степеней свободы у судов: в процессе моделирования судно не меняло своего пространственного положения при деформации свободной поверхности.

Несмотря на допущения, принятые в расчете, такой подход может быть использован для практических оценок. При наличии достоверных сведений о расходе топлива до модернизации такой подход может быть использован непосредственно для прогнозирования экономических последствий модернизации судна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бронников А.В. Проектирование судов: Уч. — Л.: Судостроение, 1991. — 320 с., ил.
2. Овчинников К.Д. Анализ полного сопротивления корпуса судна на различных скоростях хода. Труды ИСП РАН. — Т. 31. — Вып. 6. 2019, стр. 195 — 202. DOI: 10.15514/ISPRAS — 2019 — 31(6) — 12.
3. Kiryanto D.Ch., Firdhaus A. Analysis of Total Ships Resistance with Variation of Hull Bow Types, Ulstein X-Bow, Spherical and Tapering Bulbous Bow using CFD Method. In Proceedings of the 6th International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, Environmental and Natural Disaster Management (ISOCEEN 2018), pp. 60 — 64. DOI: 10.5220/0008374400600064.
4. Seok W., Kim Gw.H., Seo J. and Rhee S.H. Application of the Design of Experiments and Computational Fluid Dynamics to Bow Design Improvement. Journal of Marine Science and Engineering 2019, 7, p. 226. DOI:10.3390/jmse7070226
5. Mahmood Sh., Huang D. Computational Fluid Dynamics Based Bulbous Bow Optimization Using a Genetic Algorithm. Journal of Marine Science and Application. 11. 10.1007/s11804-012-1134-1.
6. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2020. — 326 с.
7. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля: в 3 Т. — Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. — Л.: Судостроение, 1985. — 786 с., ил.
8. Али Р., Тряскин Н.В. Изучение влияния относительного взаимного расположения двух движущихся параллельно судов на их гидродинамические характеристики. Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-3 (50). с. 59 — 65. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.042
9. Ansys Fluent, Release 2021 R1, Help System, Fluent help, user manual, 26.3.5 Modeling Open Channel Flows, ANSYS, Inc.

## REFERENCES

1. Bronnikov A.V. *Proektirovanie sudov* [Ship design]. Leningrad, Sudostroenie, 1991. 320 p.
2. Ovchinnikov K.D. *Analiz polnogo soprotivleniya korpusa sudna na razlichnykh skorostyakh khoda* [Analysis of total resistance for different ship speeds]. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 31, issue 6, 2019. pp. 195 — 202.
3. Kiryanto, Deddy Chrismianto and Ahmad Firdhaus. Analysis of Total Ships Resistance with Variation of Hull Bow Types, Ulstein X-Bow, Spherical and Tapering Bulbous Bow using CFD Method. In Proceedings of the 6th International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, Environmental and Natural Disaster Management (ISOCEEN 2018), pages 60-64. DOI: 10.5220/0008374400600064.
4. Woochan Seok, Gwan Hoon Kim, Jeonghwa Seo, and Shin Hyung Rhee. Application of the Design of Experiments and Computational Fluid Dynamics to Bow Design Improvement. Journal of Marine Science and Engineering 2019, 7, 226. DOI:10.3390/jmse7070226
5. Shahid Mahmood, Debo Huang. Computational Fluid Dynamics Based Bulbous Bow Optimization Using a Genetic Algorithm. Journal of Marine Science and Application. 11. 10.1007/s11804-012-1134-1.
6. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, RS, 2020 326 p. (In Russian)
7. Voytkunsky Ia.I. *Spravochnik po teorii korablia* [Ship theory handbook], Leningrad, Sudostroenie, 1985. 786 p.
8. Rami Ali, Nikita V. Tryaskin. Study the influence of the relative position of two vessels moving in parallel on their hydrodynamic characteristics. Marine intellectual technologies, No. 4, Part 3, 2020. pp. 59 — 65. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.042
9. Ansys Fluent, Release 2021 R1, Help System, Fluent help, user manual, 26.3.5 Modeling Open Channel Flows, ANSYS, Inc.