

DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-68-80

УДК 629.5.016

М.П. Лобачев , В.Н. Новоселов , Ю.Н. Поляков, А.А. Рудниченко ,
Т.И. Сайфуллин , А.Е. Таранов 

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА ТРАНСПОРТНОГО СУДНА

Объект и цель научной работы. Целью исследования является валидация методики оптимизации пропульсивного комплекса транспортных судов с использованием суперкомпьютерных технологий. Оптимизация формы корпуса и гребного винта осуществляется применительно к судну проекта 1594.

Материалы и методы. Процесс оптимизации проходит под управлением российского программного комплекса pSeven. В качестве вычислительного ядра используется программа Star-CCM+ (Siemens), генерация трехмерной параметрической модели гребного винта производится в программе BladePlus, разработанной в Крыловском государственном научном центре, генерация трехмерной параметрической модели корпуса судна производится в программном комплексе, реализованном в среде системы NX (Siemens).

Для определения гидродинамических характеристик пропульсивного комплекса используются методы вычислительной гидродинамики. Характеристики течения вязкой жидкости находятся из решения методом контрольного объема нестационарных уравнений Рейнольдса (URANS), замкнутых двухпараметрической полуэмпирической моделью турбулентности.

Основные результаты. Получена новая форма носовой оконечности судна, снижающая волновое сопротивление судна при сохранении исходных габаритных размеров. Также получена новая форма гребного винта, обладающая повышенным по сравнению с исходным гребным винтом коэффициентом полезного действия (КПД) с учетом ограничений на располагаемый момент на валу.

Расчетные гидродинамические характеристики подтверждены результатами модельных испытаний в глубоководном опытовом бассейне. Расчет ходкости показал рост достижимой скорости хода оптимизированного пропульсивного комплекса на различных режимах движения.

Заключение. В ходе выполнения оптимизационных исследований, направленных на увеличение эффективности пропульсивного комплекса судна проекта 1594, получены новые формы корпуса и движителя. Данное решение характеризуется повышенным КПД движителя и пониженным волновым сопротивлением судна. Результаты численного моделирования подтверждены данными экспериментальных исследований.

Ключевые слова: численное моделирование, оптимизация, параметрическая модель, валидация.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2021-4-398-68-80

UDC 629.5.016

M. Lobachev , V. Novoselov , Yu. Polyakov, A. Rudnichenko ,
T. Saifullin , A. Taranov 

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

VALIDATING PROPULSION SYSTEM OPTIMIZATION PROCEDURE FOR A CARRIER VESSEL

Object and purpose of research. This research was intended to validate supercomputer-based optimization procedure for propulsion systems of carrier ships, with a case study of hull shape and propeller optimization for a Project 1594 vessel.

Для цитирования: Лобачев М.П., Новоселов В.Н., Поляков Ю.Н., Рудниченко А.А., Сайфуллин Т.И., Таранов А.Е. Валидация методики оптимизации пропульсивного комплекса транспортного судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021; 4(398): 68–80.

For citations: Lobachev M., Novoselov V., Polyakov Yu., Rudnichenko A., Saifullin T., Taranov A. Validating propulsion system optimization procedure for a carrier vessel. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021; 4(398): 68–80 (in Russian).

Materials and methods. The optimization proceeds in Russian software package pSeven. The computation core is Siemens Star CCM+ software. Three-dimensional parametric model of the propeller is generated in KSRC-developed *BladePlus* software, whereas three-dimensional parametric model of the hull is generated in Siemens NX software package. Hydrodynamic parameters of the propulsion system are obtained as per CFD methods. Viscous flow parameters are obtained through control volume-based solution of unsteady Reynolds equations (URANS) closed by biparametric semi-empirical turbulence model.

Main results. The study yielded a new bow shape offering lower wave-making resistance for the same overall dimensions. It also yielded a new shape of propeller offering higher efficiency than the initial one taking into account the limitations for available shaft torque. Design hydrodynamic parameters have been confirmed by the model test data obtained at KSRC Deep-water Test Tank. Propulsion performance calculation has shown a growth in the achievable speed of the optimized propulsion system in different running conditions.

Conclusion. The optimization studies intended to improve propulsion efficiency of Project 1594 ships yielded new shapes for hull and propeller. The solution thus obtained features high propeller efficiency and low wave-making resistance of the hull. Numerical simulation results have been confirmed with experimental data.

Key words: numerical simulation, optimization, parametric model, validation.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Постоянные изменения спроса и предложения заставляют производителей вести активный поиск путей повышения технических характеристик объектов. В связи с этим оптимизация стала одной из самых востребованных задач в промышленности и широко применяется в авиастроении, космической технике, автомобилестроении, турбомашиностроении и судостроении.

При решении задач оптимизации перед инженерами и исследователями встают такие вопросы, как улучшение характеристик конструкции при сохранении прочности, повышение КПД исследуемого объекта при сохранении других заданных характеристик, уменьшение веса или габаритов изделия без потери основных функциональных возможностей. [1].

В последние несколько лет в Крыловском научном центре ведутся работы по созданию технологии многокритериальной оптимизации импульсивных комплексов (корпус + движитель) надводных водоизмещающих судов с использованием суперкомпьютерной техники и последних достижений в области разработки программного обеспечения. При этом для расчета гидродинамических характеристик как движителя, так и корпуса судна используются методы, основанные на решении уравнений Рейнольдса (RANS). Это позволяет проводить оптимизацию с более корректным учетом влияния вязкости, в т.ч. с учетом реального взаимодействия движителя и корпуса судна. По отношению к движителю это дает возможность более точного учета локального влияния вязкости, особенно на корневых и концевых сечениях [2].

Работы последних лет по данной тематике [3] локальный учет вязкости на винте не обеспечивают, но для интегральных гидродинамических характеристик (ГДХ) дают близкие результаты. Предварительные результаты оптимизации моделей гребных винтов (ГВ) в однородном потоке, полученные в Крыловском центре, опубликованы в работах [4, 5].

В работе [1] дано описание алгоритма многокритериальной оптимизации ГВ с учетом влияния корпуса судна, а также приведены результаты анализа гидродинамических и кавитационных характеристик полученных решений. Заявленные характеристики технологии оптимизации подтверждены на подробных расчетных моделях, учитывающих наиболее принципиальные факторы. Вопросы устойчивости оптимизационного алгоритма и выбора влияющих на целевые функции параметров также рассмотрены в работе [1].

Ключевым моментом дальнейшего развития технологии оптимизации является переход к ее применению для натуральных условий. Использование RANS-методов позволяет это сделать наиболее корректно в отличие от идеальной жидкости, используемой другими исследователями. Именно в создании и валидации новых технологий численного моделирования, которые могут использоваться при проектировании надводных водоизмещающих судов и их движителей как в модельном, так и в натурном масштабах, заключается научная новизна настоящей работы.

Процесс оптимизации проходит под управлением российского программного комплекса pSeven [6]. Используется современный оптимизационный алгоритм на основе метамоделей (surrogate-based optimization), который характеризуется низкими требова-

ниями к вычислительным ресурсам. Суть данного алгоритма заключается в замене полной модели на быстро вычисляемую суррогатную модель. Обзор суррогатных методов оптимизации подробно рассмотрен в работе [7]. В качестве вычислительного ядра используется программа Star-CCM+. Генерация трехмерной параметрической модели корпуса судна выполняется в программном комплексе Siemens NX.

Генерация трехмерной параметрической модели гребного винта производится в программе BladePlus, разработанной в Крыловском центре ведущим инженером-программистом В.Н. Новоселовым [8]. Данная программа реализует требования отраслевого стандарта ОСТ 5.0317-80. «Винты гребные фиксированного шага морских судов. Правила математического представления поверхности лопастей», дополняя их алгоритмами построения гидродинамически цельных параметрических поверхностей и механизмами трансформации (free form deformation, FFD). Эти механизмы позволяют вместо исходного многоточечного распределения работать с его гладкой деформацией, используя минимальное количество параметров – от одного до четырех – для самых сложных S-образных изменений исходной кривой [9].

В качестве целевых функций при оптимизации использованы максимум КПД гребного винта и минимум сопротивления корпуса судна. В качестве ограничений применены требуемый упор движителя, располагаемый момент на гребном валу и габаритные ограничения исходного пропульсивного комплекса.

Создание параметрических моделей

Generation of parametric model

Параметрическая модель корпуса судна

Параметрическая модель надводного водоизмещающего судна реализована в среде универсальной системы геометрического моделирования NX фирмы Siemens. Программные средства разработаны с использованием графического языка GRIP данной системы и C++ с использованием средств NX Open API (Application Programming Interface). Для построения поверхности корпуса судна используются поверхности класса NURBS, позволяющие строить, аппроксимировать поверхности сложной формы, гибко и удобно их модифицировать. Построение поверхностей выполняется по регулярной сетке.

В отличие от традиционного для судостроительных САПР (AVEVA и FORAN) способа построения судовой поверхности с помощью множества стыкуемых между собой поверхностей-лоскутов выполняется построение единой судовой поверхности (точнее, половины корпуса до ДП). Это дает возможность гибко менять положение управляющих точек-полюсов единой поверхности, исключая ручные операции по подгонке и стыковке отдельных лоскутных поверхностей.

При изменениях сохраняется гладкая форма судовой поверхности и, что особенно ценно, обеспечивается непрерывный процесс параметрических преобразований в ходе оптимизации без прерываний на ручные операции. Реализация такого процесса обеспечивается рядом разработанных программных модулей, предназначенных как для построения исходной единой параметрической поверхности с особым пространственным расположением управляющих точек, так и для модификации судовой поверхности в процессе оптимизации.

В качестве основной входной информации программы выступает трехмерная поверхностная геометрическая модель корпуса судна-прототипа, над которой выполняются те или иные технологические операции преобразования.

В настоящее время реализованы пять вариантов глобальных технологических операций преобразования формы корпуса:

- изменение длины, ширины, осадки;
- изменение радиуса цилиндрической вставки;
- изменение длины судна за счет изменения длины цилиндрической вставки (с сохранением формы носового и кормового заострения);
- изменение параметров цилиндрической вставки при фиксированной длине (с отдельным изменением формы носового и кормового заострения);
- изменение углов наклона форштевня и кормы.

В дополнение к глобальной модификации корпуса разработана программа локальных изменений формы бульба. В настоящее время реализованы следующие локальные операции:

- изменение трех параметров: длины, ширины и высоты бульба;
- неравномерный сдвиг сечений для изменения формы бульба (получение «курносого» бульба);
- сдвиг центра тяжести бульба вверх или вниз.

В ходе оптимизации управляющая программа rSeven изменяет параметры в файле модели судна-прототипа. Модификация корпуса выполняется за счет изменения ограниченного числа управляющих параметров. При изменении параметров выполняется

одновременное изменение по определенным зависимостям координат точек-полюсов для больших районов NURBS-поверхности при сохранении гладкости формы корпуса. Далее поверхность корпуса судна (с модифицированным бульбом при необходимости) на каждом конкретном шаге оптимизационной процедуры перестраивается с экспортированием твердотельной модели для использования в пакете гидродинамического анализа (рис. 1).

Параметрическая модель гребного винта

Параметрическая модель гребного винта реализована в программном обеспечении (ПО) BladePlus, разработанном в Крыловском государственном научном центре.

Данная программа создана для генерации движителей (в т.ч. автоматической) по стандартным параметрам. Она принимает на входе компактное и очень гибкое XML-описание геометрии, строит b-гер-оболочку винта со всеми его особенностями – гладким примыканием к ступице, а также специальным образом профилированной задней и верхней кромками. В качестве выходных данных программа отдает сетки в форматах CAD- и CFD-систем. Если стоит задача проектирования винта, дальнейших CFD-расчета и оптимизации, то BladePlus полностью заменяет CAD-систему. Более того, в пакет вычислительной гидродинамики передается уже готовая для расчета поверхностная сетка.

Основная проблема, возникающая при создании параметрической модели гребного винта, – это большое число параметров. Лопасть ГВ в соответствии с отраслевым стандартом описывается набором сплайнов, в каждый из которых входят от 8 до 13 опорных точек. Основными безразмерными геометрическими элементами лопасти движителя являются: хорда, толщина, кривизна, шаг, саблевидность, откидка, позиция максимальной кривизны и позиция максимальной толщины.

Таким образом, принимая каждую опорную точку сплайна как параметр, мы получаем около 100 параметров на лопасть гребного винта, что недопустимо много в рамках проведения инженерной оптимизации с моделированием течения вязкой жидкости. Эту проблему решает ПО BladePlus с помощью технологии Free Form Deformation. Накладыванием на исходные сплайны деформационной кривой удалось сократить количество параметров до 32, причем математически и физически обосновано варьирование лишь 23 параметров на лопасти. Кроме того, благодаря вышеуказанной

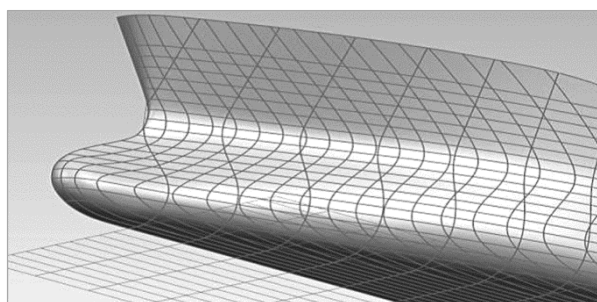


Рис. 1. Параметрическая модификация судовой поверхности

Fig. 1. Parametric modification of ship surface

технологии поверхность лопасти получается всегда гладкая и согласованная.

На рис. 2 (см. вклейку) показан внешний вид исходного XML-файла с параметрами ГВ и итоговая параметрическая модель, получаемая в ПО BladePlus.

Постановка задачи определения сопротивления корпуса судна

Statement of problem in definition of ship hull resistance

Так как при выполнении данной работы ставилась задача уменьшения волнового сопротивления за счет оптимизации формы бульба, то возможно решение этой задачи без учета работы ГВ. В общем случае, в т.ч. при оптимизации формы кормовой оконечности для устранения отрывных явлений, требуется решение задачи с учетом работы ГВ.

Задача об определении буксировочного сопротивления судна решается в нестационарной постановке со схемами второго порядка для дискретизации по пространству и первого порядка для дискретизации времени. Построение гексаэдральных расчетных сеток выполнено с помощью встроенного в пакет Star-CCM+ генератора сеток. Толщина первого слоя призматического подслоя y_1^+ на большей части поверхности корпуса модели судна составляет 40–100. Во всех расчетах используется модель турбулентности $k-\omega$ SST [10] в комбинированном высоко- и низкорейнольдсовом варианте.

Оптимизация представляет собой серию циклов, во время каждого из которых необходимо проведение численного моделирования. Поэтому при подготовке расчетной модели для виртуальных буксировочных испытаний для оптимизации необходимы упрощения и допущения, позволяющие экономить вычислитель-

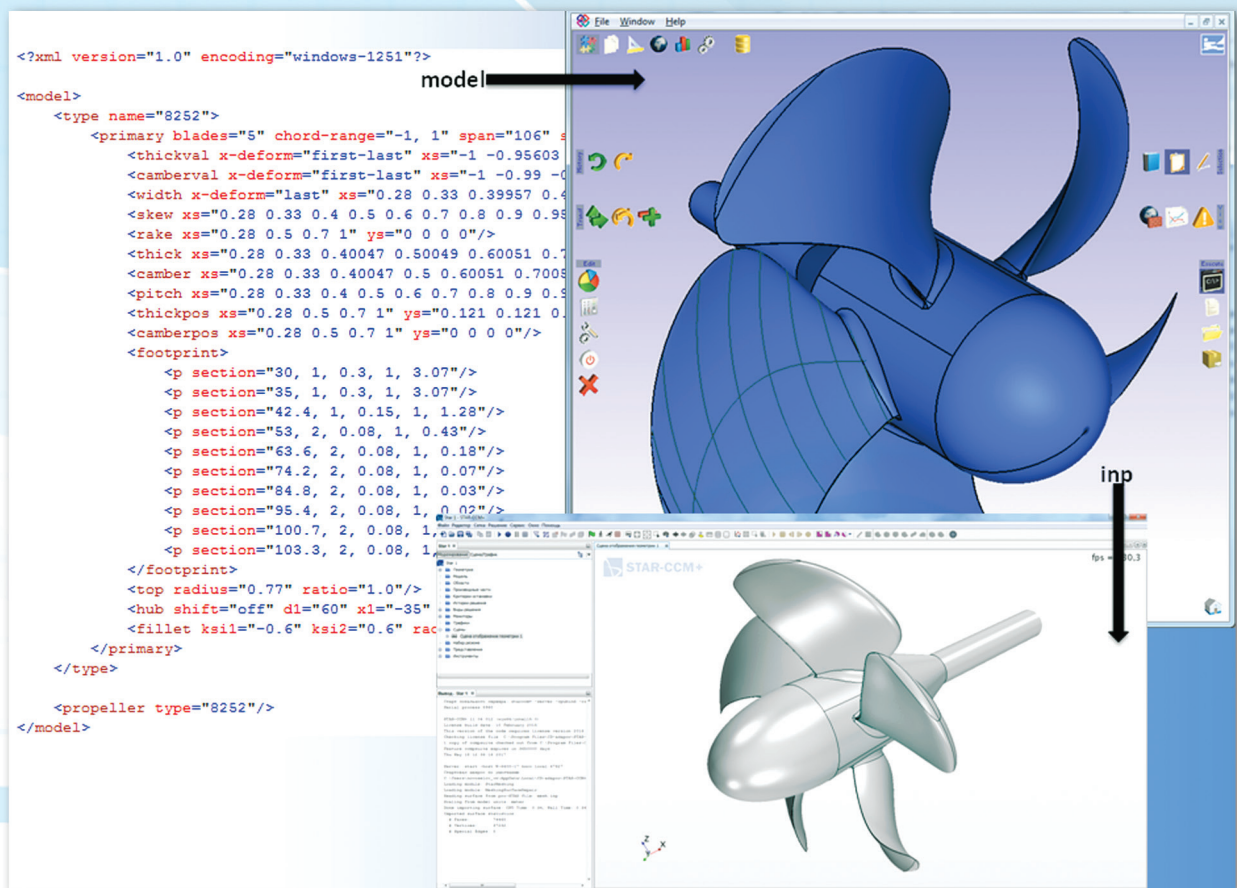


Рис. 2. Создание параметрической модели гребного винта
Fig. 2. Development of parametric propeller model

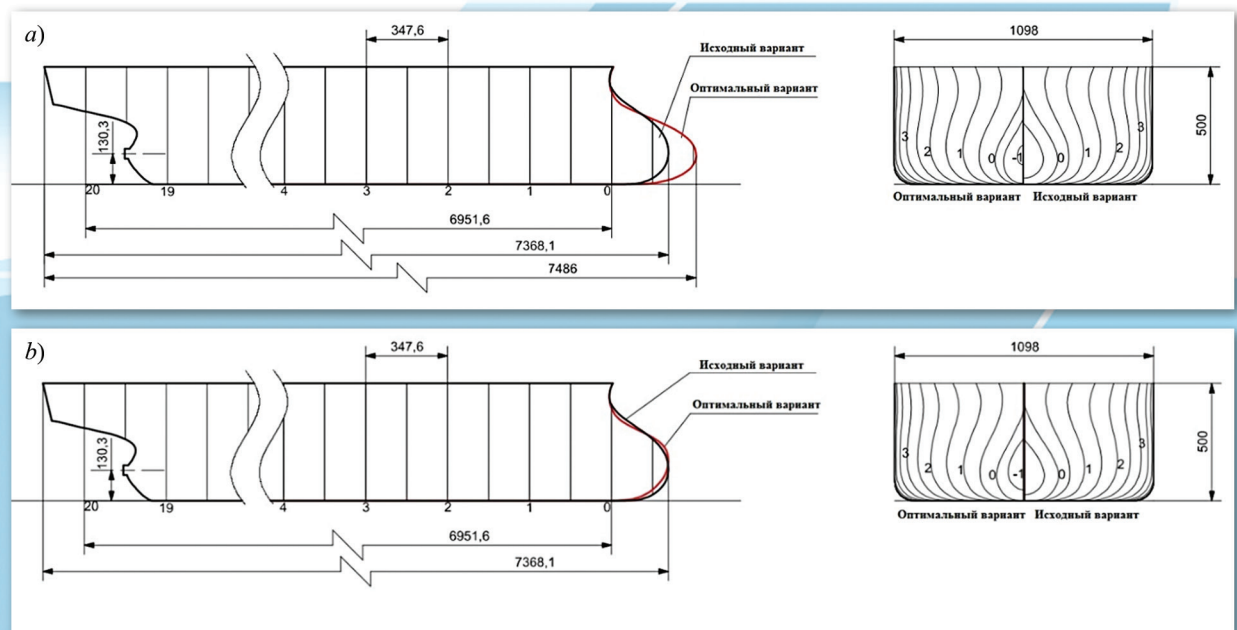


Рис. 3. Эскизы поверхностей оптимизированных моделей корпуса судна № 1 (а) и № 2 (б)
Fig. 3. Surface sketches of optimized hull models: Ship 1 (a) and Ship 2 (b)

ные и временные ресурсы. Следует также понимать, что в процессе оптимизации необходимо проводить сравнительный анализ результатов отдельных циклов, а не валидацию результатов на основе данных физических буксировочных испытаний.

Основными направлениями экономии вычислительных ресурсов являются:

- выбор максимально допустимого по величине шага по времени;
- выбор минимально допустимой размерности расчетной сетки;
- фиксированная посадка корпуса судна.

С целью достижения минимально допустимой размерности расчетной сетки принято решение учитывать только половину корпуса судна с плоскостью симметрии в диаметральной плоскости. Предварительные исследования показали, что переход к подобной постановке приводит к погрешности по сопротивлению в $\Delta R \approx 0,5 \%$, что вполне допустимо и дает экономию по размерности расчетной сетки в два раза.

Предварительные исследования также показали, что изменение шага по времени, соответствующего критерию Куранта – Фридрихса – Леви (CFL) $\approx 0,3$, на $CFL \approx 3$ (в области расходящихся волн) привело к изменению сопротивления $\Delta R \approx 0,6 \%$, что также является допустимым и дает экономию времени счета в 4 раза. Окончательный размер расчетной сетки составил 1,55 млн ячеек, а сходимость по интегральным характеристикам и полям скорости достигнута за 60 с времени счета.

Результаты оптимизационных исследований параметрической модели корпуса судна

Optimization research results
for parametric hull model

При проведении оптимизации поверхности модели корпуса судна было решено ограничиться определенным набором параметров, т.к. большой их набор предполагает проведение большого числа циклов и делает задачу трудоемкой. Далее в работе рассматривается только оптимизация носового бульба корпуса судна проекта 1594. Выбраны следующие геометрические параметры бульба: относительное удлинение вперед, ширина и высота, а также смещение носовой точки по вертикальной координате (параметр, управляющий загибом бульба вверх, его «курносостью»).

Основными программными (технологическими) ограничениями являются возможности построения

CAD-модели поверхности корпуса судна с различными геометрическими параметрами носового бульба. Так, при увеличении одного из параметров выше предложенных пределов может возникнуть излом поверхности модели корпуса судна, а при уменьшении одного из параметров ниже предложенных может возникнуть искажение поверхности – ее волнение.

Кроме того, важным проектным ограничением может являться габаритная длина судна. Увеличение длины носового бульба за носовой габарит судна может сделать эксплуатацию судна трудной или невозможной. Поскольку данное дополнительное ограничение относится к вопросам проектирования судов, было решено провести две оптимизации с целью получения оптимальной формы носового бульба – с дополнительным ограничением и без дополнительного ограничения по длине. В данном случае это проверка возможностей технологии оптимизации.

При проведении численного моделирования в рамках оптимизационного цикла предполагается замена CAD-модели корпуса судна в задаче с достигнутой сходимостью по интегральным характеристикам и полям скорости, проведение расчетов в течение 25 с и осреднение результата за последние 5 с. Управление проведением численного моделирования в рамках оптимизационного цикла осуществляется с помощью программы java «Автоматизированный расчет интегральных характеристик параметрической модели корпуса судна с учетом влияния свободной поверхности».

Для учета эксплуатационного портрета судна проекта 1594 оптимизационные поиски выполняются для двух нагрузок: полный груз и нагрузка, соответствующая заводским ходовым испытаниям (ЗХИ), близкая к балластной. Последняя выбрана в связи с наличием соответствующих данных натурных испытаний. Расположение блоков, отвечающих за численное моделирование, осуществляется в блоксхеме оптимизатора таким образом, чтобы выполнение расчетов для нескольких режимов движения осуществлялось в параллельном режиме использования вычислительных ресурсов.

Выполнение оптимизационных поисков включало 153 оптимизационных цикла. Осуществлялся поиск оптимальных значений четырех геометрических параметров на основе полусуммы сопротивления движению модели корпуса судна, полученного для двух режимов движения. Эскиз поверхности модели корпуса оптимизированного

судна в сравнении с поверхностью модели корпуса исходного судна приведен на рис. 3а (см. вклейку) для оптимизационных поисков, выполненных с ограничением по длине бульба 150 % от исходного (модель № 22-35-28, далее – модель № 1) и на рис. 3б (см. вклейку) для оптимизационных поисков, выполненных с ограничением по длине бульба 100 % от исходного (модель № 07-10-00, далее – модель № 2).

По итогам оптимизационных поисков проведены виртуальные буксировочные испытания оптимизированных моделей судна проекта 1594 (модель № 1 и модель № 2) в условиях, соответствующих ЗХИ судна проекта 1594, и в условиях полного груза для ряда чисел Фруда. Результаты виртуальных буксировочных испытаний представлены в табл. 1 и 2.

Фактически выигрыш по сопротивлению на ходовых режимах достигается только при балластной осадке (условия ЗХИ). В полном грузу на ходовом режиме выигрыш практически отсутствует, но и ухудшения результатов не происходит. Ограничение по длине бульба несколько снижает выигрыш по сопротивлению при балластной осадке, но он остается достаточно значимым. При увеличении скорости и выходе за ходовой режим выигрыш по сопротивлению сокращается.

Отсутствие выигрыша по сопротивлению в полном грузу вполне объяснимо. По свидетельству ведшего данный проект в 1970 г. Г.И. Каневского разработку формы исходного бульба выполнял В.Н. Бегизов, один из лучших специалистов в области отработки обводов проектируемых объектов [11]. При этом он отрабатывал форму бульба именно под осадку в полном грузу.

Таким образом, можно констатировать, что использование формализованных процедур и соответствующего программного обеспечения при отработке формы обводов может дополнить и расширить возможности работы специалистов. Кроме того, ПО позволяет более корректно учитывать эксплуатационный портрет судна – для данного судна-рудовоза одинаково значимыми являются оба режима эксплуатации. Как показывает практика (не только судостроительная), даже для опытных специалистов отработка формы одновременно для нескольких режимов представляет сложную задачу.

На рис. 4 (см. вклейку) представлено сравнение волновых систем в носовой оконечности исходной и оптимизированных моделей судов для нагрузки, соответствующей ЗХИ. На режиме движения, соот-

Таблица 1. Результаты виртуальных буксировочных испытаний в условиях заводских ходовых испытаний

Table 1. Results of virtual towing tests: factory acceptance scenario

	R_{PRESSURE} , H	R_{FRICTION} , H	R_T , H
Fn = 0,168			
1594	12,59	28,79	42,289
Opt № 1	7,89	29,01	37,82 (–10,6 %)
Opt № 2	9,59	28,76	39,64 (–6,26 %)
Fn = 0,174			
1594	14,1	30,75	45,75
Opt № 1	8,66	30,91	40,486 (–11,51 %)
Opt № 2	10,57	30,77	42,617 (–6,85 %)
Fn = 0,18			
1594	14,96	32,64	46,706
Opt № 1	9,043	32,89	42,84 (–8,28 %)
Opt № 2	11,02	32,75	45,038 (–3,57 %)
Fn = 0,2			
1594	16,233	39,53	56,63
Opt № 1	12,367	40,22	54,317 (–4,08 %)
Opt № 2	14,98	39,71	55,918 (–1,26 %)
Fn = 0,22			
1594	24,44	47,19	72,496
Opt № 1	23,39	47,34	71,57 (–1,28 %)
Opt № 2	26,72	47,01	74,915 (+3,34 %)

Таблица 2. Результаты виртуальных буксировочных испытаний в условиях полного груза

Table 2. Results of virtual towing tests: full-load scenario

	R_{PRESSURE} , H	R_{FRICTION} , H	R_T , H
Fn = 0,168			
1594	9,557	35,662	45,695
Opt № 1	9,515	35,68	44,676 (–0,04 %)
Opt № 2	9,53	35,62	44,64 (–0,12 %)
Fn = 0,174			
1594	11,09	38,07	48,64
Opt № 1	10,99	38,09	48,55 (–0,19 %)
Opt № 2	11,05	38,06	48,61 (–0,06 %)
Fn = 0,18			
1594	11,54	40,51	51,53
Opt № 1	11,69	40,54	51,72 (+0,37 %)
Opt № 2	11,78	40,51	51,79 (+0,50 %)
Fn = 0,2			
1594	18,55	48,99	67,04
Opt № 1	19,11	49,04	67,65 (+0,91 %)
Opt № 2	19,39	48,89	67,79 (+1,12 %)

ветствующем полному грузу, отличий в волновых системах не наблюдается.

В качестве окончательного варианта для валидации принят вариант модели № 2, как удовлетворяющий требованиям по габаритным размерам носового бульба.

Постановка задачи определения гидродинамических характеристик гребного винта

Formulation of task for determination of hydrodynamic propeller performance

Задача об определении ГДХ гребного винта, работающего за корпусом судна (виртуальные самоходные испытания), решается в нестационарной постановке со схемами второго порядка для дискретизации по пространству и времени. В качестве модели турбулентности использована $k-\omega$ SST модель Ментера в низкорейнольдсовой постановке в сочетании с моделью ламинарно-турбулентного перехода Ментера – Лэнгтри [12] (в случае расчета обтекания модели ГВ). В расчетах принята плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, динамическая вязкость $\mu = 1,141 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Призматическая область расчетной сетки состоит из 20 слоев. Толщина первого слоя призматического подслоя на гребном винте ($1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}$) выбрана исходя из удовлетворения требований модели ламинарно-турбулентного перехода к значению безразмерной величины y^+ . Размерность расчетной сетки составляет 9,3 млн ячеек при выполнении контрольных расчетов и 5,4 млн ячеек при использовании внутри оптимизационного цикла (в этом случае учет свободной поверхности не производится).

Подробнее описание задачи численного моделирования работы гребного винта за корпусом судна и валидация результатов представлены в работе [13].

Результаты оптимизационных исследований параметрической модели гребного винта

Results of optimization studies on propeller parametric model

Оптимизационные исследования выполняются для параметрической модели ГВ, работающего за корпусом судна проекта 1594. В качестве модели-прототипа используется параметрическая модель ГВ проекта 1594.

Оптимизационные исследования параметрической модели гребного винта состоят из следующих работ:

- выполнение оптимизационных поисков в модельном масштабе с использованием модели ламинарно-турбулентного перехода;
- выполнение оптимизационных поисков в натурном масштабе;
- моделирование виртуальных самоходных испытаний по результатам оптимизационных поисков.

Изменяемые параметры геометрической модели гребного винта: распределение ширины лопасти по радиусу $C/R(r)$ – 2 параметра; распределение саблевидности по радиусу $Cs/R(r)$ – 1 параметр; распределение шага по радиусу $P/R(r)$ – 2 параметра. Всего пять параметров. Данная группа параметров выбрана из всех исследованных наборов параметров на основании предварительного корреляционного анализа, подробнее описанного в работе [1, с. 63]; группа обеспечивает наилучший результат для данного гребного винта при заданных критериях и ограничениях.

Критерий: максимизация КПД (η); оптимизация по коэффициентам взаимодействия (по коэффициенту влияния корпуса) отдельно не выполнялась; однако, т.к. КПД гребного винта определялся для условий его работы за корпусом, то частично влияние корпуса было учтено.

Ограничения: нижнее ограничение дискового отношения (A_E/A_0) задается по формуле Келлера [14] (меньше исходного не более чем на 13,64 %); момент (Q) в диапазоне $\pm 1 \%$ к исходному; упор (T) не меньше исходного ($T > T_0$).

Формула Келлера

$$\frac{A_E}{A_0} = K + \frac{(1,3 + 0,3 \cdot Z) \cdot T}{D^2(p_0 + \rho gh - p_v)}, \quad (1)$$

где $K = 0-0,1$ для двухвального судна и $K = 0,2$ для одновального судна.

В ходе оптимизационных поисков получены решения, представленные в табл. 3 и на рис. 5.

Условия проведения контрольных виртуальных самоходных испытаний для модельного и натурального масштабов соответствуют режиму полного груза и приведены в табл. 4. Результаты контрольных виртуальных самоходных испытаний, выполненных в модельном и натурном масштабах для обоих полученных оптимальных решений, приведены в табл. 5. Полужирным шрифтом в табл. 5 выделены расчетные случаи,

Таблица 3. Результаты оптимизационных поисков гребного винта проекта 1594

Table 3. Optimization research results for Project 1594 propeller

Гребной винт проекта 1594		A_E/A_0	Момент, Н·м	Упор, Н	КПД
Модельный масштаб (ламинарно-турбулентный переход)	Исходный ГВ	0,714	1,2288	44,72	0,7576
	Оптимизированный ГВ № Opt_1_184	0,699	1,2127	44,83	0,7695
		-2,0 %	-1,3 %	+0,2 %	+1,2 %
Натурный масштаб	Исходный ГВ	0,714	757 120	990 110	0,7895
	Оптимизированный ГВ № Opt_FS_59	0,617	751 422	1 001 001	0,8042
		-13,5 %	-0,8 %	+1,1 %	+1,47 %

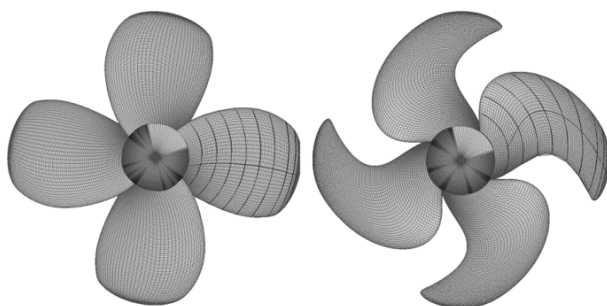


Рис. 5. Сравнение формы исходного (слева) и оптимизированного (справа) гребных винтов судна проекта 1594

Fig. 5. Initial (left) versus optimized (right) propeller shape of Project 1594 ship

Таблица 4. Условия проведения контрольных виртуальных самоходных испытаний

Table 4. Conditions of control virtual self-propulsion tests

	Натурный масштаб	Модельный масштаб
Диаметр ГВ D , м	5,8	0,2
Частота вращения ГВ n , rpm	2,073	11,165
Скорость судна V_s , м/с	7,8642	1,460
Длина между перпендикулярами L_{pp} , м	208,1	7,176
Осадка носом и кормой $T_n = T_k$, м	11,7	0,403
Поступь J_s	0,6540	0,6540
Число Фруда, F_n	0,1741	0,1741
Площадь смоченной поверхности корпуса S , м ²	9590	11,403

Таблица 5. Результаты контрольных виртуальных самоходных испытаний

Table 5. Results of control virtual self-propulsion tests

	Исходный ГВ	Opt_1_184	Отклонение	Opt_FS_59	Отклонение
Модельный масштаб					
R , Н	-60,59	-60,639	+0,08 %	-60,49	-0,17 %
T , Н	49,67	49,89	+0,44 %	49,176	-0,99 %
Q , Р·м	1,2186	1,207	-0,95 %	1,163	-4,56 %
K_T	0,2490	0,2501		0,2465	
K_Q	0,0305	0,0303		0,0292	
η_0	0,8485	0,8604	+1,19 %	0,8802	+3,17 %
Натурный масштаб					
R , Н	910 404	914 126	+0,41 %	919 900	+1,04 %
T , Н	1 093 615	1 106 362	+1,17 %	1 118 584	+2,28 %
Q , Н·м	744 759	750 402	+0,76 %	747 300	+0,34 %
K_T	0,2248	0,2274		0,2299	
K_Q	0,0264	0,0266		0,0265	
η_0	0,8865	0,8900	+0,36 %	0,9036	+1,7 %

соответствующие условиям проведенных оптимизационных поисков.

Как видно из табл. 5, для гребного винта, оптимизированного в натурном масштабе, заявленное увеличение КПД подтвердилось. Для ГВ, оптимизированного в модельном масштабе, контрольные виртуальные самоходные испытания, выполненные в натурном масштабе, показали незначительное по сравнению с исходным гребным винтом увеличение КПД. В то же время контрольные виртуальные самоходные испытания, выполненные в модельном масштабе, подтвердили характеристики, полученные при проведении оптимизации в модельном масштабе.

Как отмечено во введении, использование численного моделирования на основе RANS-методов позволяет корректно учитывать вязкостные эффекты, в т.ч. для натурного масштаба объектов. Кроме того, выполнение процедуры оптимизации двигателя непосредственно в натурном масштабе позволяет уйти от необходимости учета масштабного эффекта при пересчете результатов оптимизации.

Валидация результатов

Validation of results

Для валидации результатов оптимизационных поисков были изготовлены две модели пропульсивного комплекса (исходный и оптимизированный вариант № 2 модели корпуса судна, исходный

и оптимизированный варианты модели ГВ) и проведен комплекс экспериментальных исследований в глубоководном опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Экспериментальные исследования включали в себя определение кривых действия моделей гребных винтов, определение буксировочного сопротивления моделей судов и выполнение самоходных испытаний двух моделей судов, оснащенных гребными винтами.

На рис. 6 (см. вклейку) и в табл. 6 представлено сравнение гидродинамических характеристик моделей базового (8538) и оптимизированного (8537) винта судна проекта 1594, полученных как расчетным, так и экспериментальным методами. Погрешность определения ГДХ гребных винтов расчетными методами составляет 1–5 % для коэффициентов упора и момента и около 1 % для КПД. Исключение составляют режимы, близкие к поступи нулевого упора, где измеряемые величины стремятся к нулю и точность их определения падает как в расчетах, так и в эксперименте.

Как видно из представленных материалов, прогнозируемые ГДХ гребного винта, форма которого получена путем оптимизации параметрической модели, подтверждены экспериментальными данными во всем диапазоне исследованных режимов.

На рис. 7 (см. вклейку) приведено сравнение полного буксировочного сопротивления модели судна проекта 1594 с исходной и с оптимизиро-

Таблица 6. Сравнение гидродинамических характеристик моделей базового (8538) и оптимизированного (8537) винта судна проекта 1594

Table 6. Hydrodynamic performance of basic (No. 8538) and optimized (No. 8537) propeller models for Project 1594 ship

J	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8
KT_8538_CFD	0,2721	0,2234	0,1734	0,1233	0,0976	0,0712	0,0434	0,0127
10KQ_8538_CFD	0,3336	0,2894	0,2431	0,1952	0,1700	0,1428	0,1141	0,0828
eta_8538_CFD	0,3894	0,4914	0,5674	0,6034	0,5941	0,5553	0,4538	0,1957
KT_8537_CFD	0,2673	0,2190	0,1697	0,1192	0,0932	0,0664	0,0352	0,0024
10KQ_8537_CFD	0,3171	0,2746	0,2291	0,1822	0,1563	0,1291	0,0972	0,0639
eta_8537_CFD	0,4025	0,5077	0,5895	0,6246	0,6168	0,5731	0,4318	0,0485
KT_8538_EFD	0,2586	0,2143	0,1690	0,1225	0,0984	0,0734	0,0470	0,0188
10KQ_8538_EFD	0,3123	0,2738	0,2343	0,1918	0,1688	0,1443	0,1181	0,0902
eta_8538_EFD	0,3954	0,4982	0,5741	0,6100	0,6032	0,5668	0,4754	0,2653
KT_8537_EFD	0,2524	0,2095	0,1645	0,1176	0,0929	0,0667	0,0380	0,0057
10KQ_8537_EFD	0,2945	0,2604	0,2227	0,1802	0,1564	0,1304	0,1015	0,0688
eta_8537_EFD	0,4092	0,5122	0,5879	0,6233	0,6144	0,5696	0,4470	0,1045

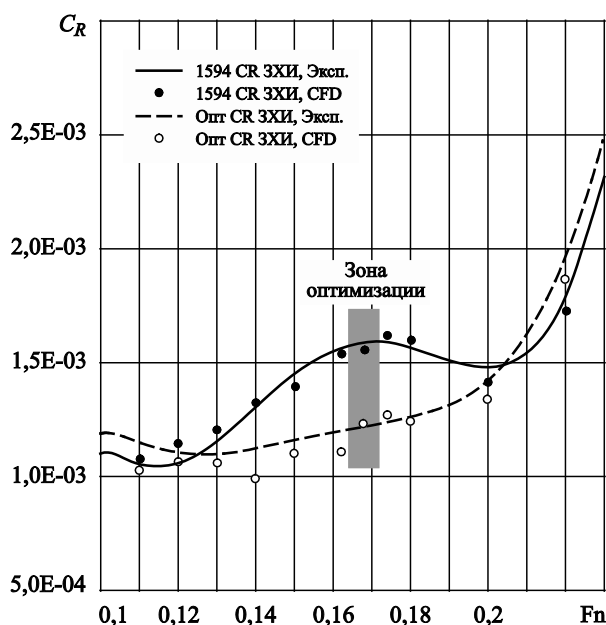


Рис. 8. Сравнение остаточного сопротивления, режим заводских ходовых испытаний

Fig. 8. Residual resistance data: factory acceptance tests

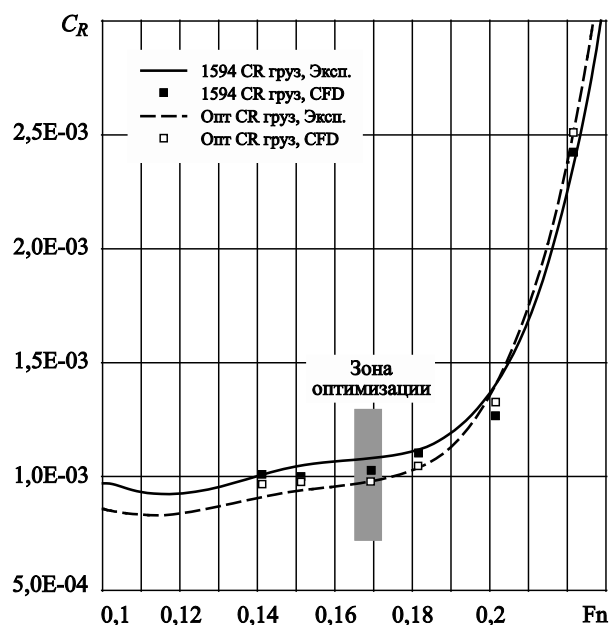


Рис. 9. Сравнение остаточного сопротивления, режим полного груза

Fig. 9. Residual resistance data: full-load running

ванной носовой оконечностью. На рис. 8 и 9 приведено сравнение коэффициентов остаточного сопротивления модели судна пр. 1594 с исходной и с оптимизированной носовой оконечностью для различных режимов нагрузки. Как видно из представленных на рис. 6–8 материалов, результаты экспериментальных исследований подтверждают прогноз по снижению сопротивления за счет изменения носовой оконечности судна, а также высокую точность методов вычислительной гидродинамики при прогнозировании сопротивления моделей судов.

На основе результатов экспериментальных исследований выполнен расчет ходкости исходного и оптимизированного пропульсивных комплексов

с использованием традиционной методики [15, 16]. Расчеты проводились на заданную при разработке проекта (1970 г.) мощность $P_s = 10\,076,3$ кВт. В табл. 7 приведены результаты расчета ходкости судна для заданной по проекту мощности. Получены достижимые при заданной мощности скорости хода.

Так как в процессе эксплуатации на конкретной линии часто требуется выдерживание заданной скорости, то представляет интерес экономия топлива, достигаемая за счет оптимизации при сохранении скорости хода. Эти результаты приведены в табл. 8 в виде снижения потребной мощности и, следовательно, экономии топлива.

Следует отметить, что для осадок, соответствующих ЗХИ и балластной, выигрыш получен

Таблица 7. Результаты расчета ходкости исходного и оптимизированного пропульсивных комплексов (расчет для заданной по проекту мощности)

Table 7. Propulsion performance calculation results: initial versus optimized propulsion system (calculation for the design power)

Условия	Скорость V_s , уз		ΔV_s , уз	ΔV_s , %
	Исходный	Оптимизированный		
Груз, $P_s = 10\,076,3$ кВт	15,14	15,73	0,59	3,90
ЗХИ, $P_s = 10\,076,3$ кВт	16,03	16,94	0,91	5,68

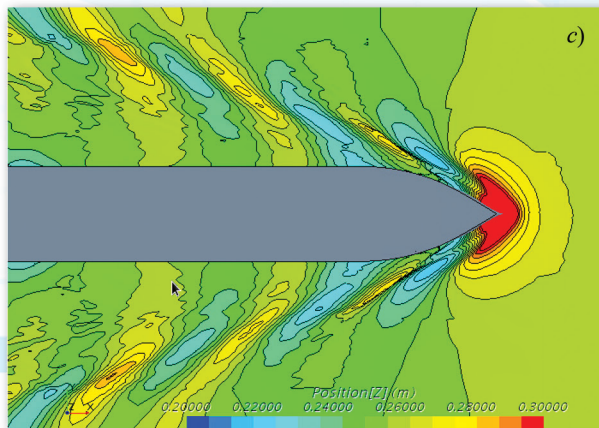
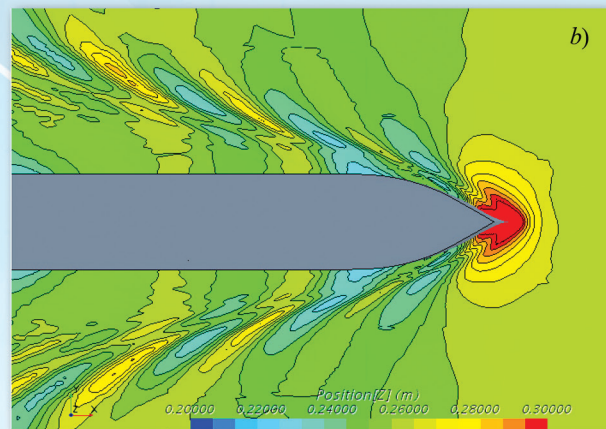
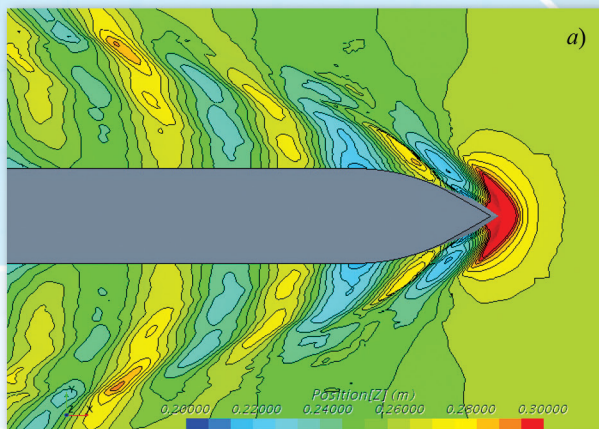


Рис. 4. Волновая система в носовой оконечности моделей судна:

a) модель судна проекта 1594;
b) оптимизированная модель № 1;
c) оптимизированная модель № 2;
водоизмещение по условиям заводских ходовых испытаний;
 $F_n = 0,18$

Fig. 4. Wave system around model bows:

a) model of Project 1594 ship;
b) optimized Ship 1;
c) optimized Ship 2;
displacement as per factory acceptance test conditions; $F_n = 0.18$

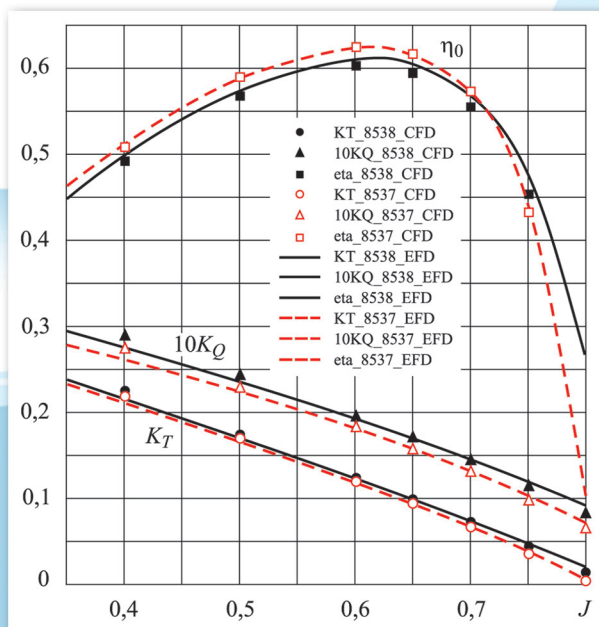


Рис. 6. Сравнение гидродинамических характеристик моделей базового (8538) и оптимизированного (8537) винта судна проекта 1594: линии – экспериментальные данные, символы – расчет

Fig. 6. Hydrodynamic performance of basic (No. 8538) and optimized (No. 8537) propeller models for Project 1594 ship: curves – test data; dots – calculation results

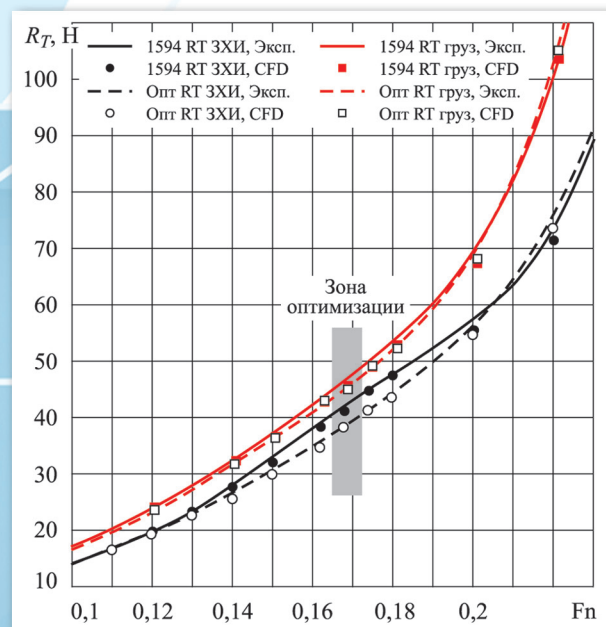


Рис. 7. Сравнение полного сопротивления режимов заводских ходовых испытаний и полного груза

Fig. 7. Total resistance: factory acceptance tests versus full-load running

Таблица 8. Результаты расчета ходкости исходного и оптимизированного пропульсивных комплексов (скорости соответствуют исходному варианту)

Table 8. Propulsion performance calculation results: initial versus optimized propulsion system (speeds correspond to the original version)

Условия	Мощность P_s , кВт		ΔP_s , кВт	ΔP_s , %
	Исходный	Оптимизированный		
Груз, $V_s = 15,14$ уз	10 076,3	8 398,0	1 678,3	16,66
ЗХИ, $V_s = 16,03$ уз	10 076,3	8 798,1	1 278,2	12,69

в основном за счет уменьшения волнового сопротивления. Для грузовой осадки выигрыш получается в большей степени за счет улучшения взаимодействия ГВ и корпуса судна, т.е. за счет коэффициента влияния корпуса. Детальный анализ составляющих получаемого эффекта и их прогнозирование на натурные условия как по пересчету модельных испытаний, так и по численному прогнозу требуют отдельной статьи и будут представлены позднее. Данная статья посвящена валидации методики оптимизации формы корпуса и ГВ.

Заключение

Conclusion

В ходе выполнения оптимизационных исследований, направленных на увеличение эффективности пропульсивного комплекса судна проекта 1594, получены новые формы корпуса и движителя. Полученное решение характеризуется повышенным КПД движителя и пониженным волновым сопротивлением судна. Результаты численного моделирования подтверждены данными экспериментальных исследований, выполненными в глубоководном опытовом бассейне Крыловского центра.

Увеличение достижимой скорости хода оптимизированного пропульсивного комплекса составляет 0,91 уз на режиме, соответствующем ЗХИ, что составляет 5,7 % от скорости хода исходного пропульсивного комплекса, и 0,59 уз на режиме полного груза, что составляет 3,9 % от скорости хода исходного пропульсивного комплекса. При сохранении скорости хода, соответствующей исходному варианту, снижение потребной мощности составляет на режиме ЗХИ 12,7 %, на режиме полного груза – 16,7 %.

Отметим, что в работе оценивались (оптимизировались) гидромеханические аспекты и поэтому отложены эксперименты по изменению глобальных параметров. В последующем интерес представят

разработка и использование комплексных моделей с оптимизацией расширенного состава проектных параметров (размерения, глобальные и локальные параметры формы корпуса, параметры деления корпуса переборками, палубами и др.) с проведением разносторонней оценки качества проектируемого судна (ходкость, ледопроездимость, вместимость грузовых помещений, посадка, остойчивость и пр.), включая оценку эффективности использования судов в составе систем морского транспорта.

Список использованной литературы

1. Многокритериальная оптимизация модели гребного винта с учетом влияния корпуса судна / Лобачев М.П., Новоселов В.Н., Сайфуллин Т.И., Таранов А.Е. // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции. Москва: МАКС Пресс, 2020. С. 60–73. URL: https://2020.russianscdays.org/files/2020/RuSCDays20_Proceedings.pdf (дата обращения: 13.09.2021).
2. Левковский Ю.Л. Шум гребных винтов. Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. 182, [1] с.
3. Tue1A: Session 5A: Design/Optimization // Proceedings of Fifth International Symposium on Marine Propulsors (SMP). Espoo, 2017. Vol. 2. P. 258–290.
4. Лаврищева Л.С., Новоселов В.Н. Оптимизация формы модели гребного винта в однородном потоке // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Спец. вып. 1. С. 75–83. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-75-83.
5. Лаврищева Л.С. Численное моделирование обтекания объектов морской техники и разработка технологии оптимизации формы гребного винта: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Лаврищева Л.С.; С.-Петерб. гос. ун-т. Санкт-Петербург, 2018. 246 с.
6. pSeven: прогр. комплекс для анализа данных и оптимизации // ДАТАДВАНС: [офиц. сайт]. Москва, 2021. URL: <https://www.datadvance.net/ru/product/pseven/> (дата обращения: 13.09.2021).

7. Forrester A., Keane A. Recent advances in surrogate-based optimization // Progress in aerospace sciences. 2009. Vol. 45, № 1–3. P. 50–79. DOI: 10.1016/j.paerosci.2008.11.001.
8. Программа для ЭВМ «BladePlus»: свидетельство об офиц. регистрации № 2019663281 Рос. Федерация / Новоселов Н.В. № 2019662332; заявл. 07.10.2019; опубл. 15.10.2019. 1 с.
9. Foeth E.J. Propeller optimization using an unsteady Boundary-Element Method // Proceedings of the Fourth international symposium on marine propulsors (SMP'15). Austin: Ocean Engineering Group, 2015. Vol. 1. P. 27–32. URL: <https://www.marinepropulsors.com/proceedings/2015/MB1-1.pdf> (дата обращения: 13.09.2021).
10. Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32, № 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
11. Творцы корабельной науки. Крыловский государственный научный центр: 1894–2017. Санкт-Петербург: Крыловский гос. науч. центр, 2017. 360 с.
12. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation // Menter F.R., Langtry R.B., Likki S.R. [et al.] // Journal of Turbomachinery. 2006. Vol. 128, № 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
13. Таранов А.Е. Определение локальных и интегральных гидродинамических характеристик контейнеровоза в цифровом бассейне // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 3(389). № 73–82. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-73–82.
14. Holtrop J., Mennen G.G.J. An Approximate Power Prediction Method // International Shipbuilding Progress. 1982. Vol. 29, № 335. P. 166–170.
15. Справочник по теории корабля: В 3-х тт. Т. 1: Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / [Войтунский Я.И. и др.]. Ленинград: Судостроение, 1985. 764 с.
16. Развитие методов прогнозирования ходовых качеств транспортных судов / Борушевич В.О., Каневский Г.И., Капранцев С.В., Клубничкин А.М., Лобачев М.П. // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 4(382). С. 21–27. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-21-28.
2. Yu. Levkovsky. Propeller noise. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2005. 182 [1] p. (in Russian).
3. Tue1A: Session 5A: Design/Optimization // Proceedings of Fifth International Symposium on Marine Propulsors (SMP). Espoo, 2017. Vol. 2. P. 258–290.
4. L. Lavrisheva, V. Novoselov. Shape optimization of propeller model in uniform flow // Transactions of the Krylov State Research Centre, 2018. Special Issue 1. P. 75–83 (in Russian). DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-75-83.
5. L. Lavrisheva. Numerical flow simulation for marine objects and development of propeller shape optimization technique. Cand. Sc. Theses, 01.02.05. St. Petersburg State University, 2018. 246 p. (in Russian).
6. pSEVEN Software package for data analysis and optimization // Official web site of DATADVANCE, Moscow, 2021. URL: <https://www.datadvance.net/ru/product/pseven/> (accessed on 13.09.2021) (in Russian).
7. Forrester A., Keane A. Recent advances in surrogate-based optimization // Progress in aerospace sciences. 2009. Vol. 45, № 1–3. P. 50–79. DOI: 10.1016/j.paerosci.2008.11.001.
8. BladePlus software: Certificate of Official Registration No. 2019663281 Russian Federation / N. Novoselov. No. 2019662332, appl. date 07.10.2019; publ. date 15.10.2019. 1 p. (in Russian).
9. Foeth E.J. Propeller optimization using an unsteady Boundary-Element Method // Proceedings of the Fourth international symposium on marine propulsors (SMP'15). Austin: Ocean Engineering Group, 2015. Vol. 1. P. 27–32. URL: <https://www.marinepropulsors.com/proceedings/2015/MB1-1.pdf> (accessed on 13.09.2021).
10. Menter F.R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32, № 8. P. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
11. Creators of ship science. Krylov State Research Centre, 1894–2017. 360 p. (in Russian).
12. Correlation-based transition model using local variables. Part 1: Model Formulation // Menter F.R., Langtry R.B., Likki S.R. [et al.] // Journal of Turbomachinery. 2006. Vol. 128, № 3. P. 413–422. DOI: 10.1115/1.2184352.
13. A. Taranov. Determination of local and integral characteristics of container ship in digital tank // Transactions of the Krylov State Research Centre, 2019. Vol. 3(389). P. 73–82 (in Russian). DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-73–82
14. Holtrop J., Mennen G.G.J. An Approximate Power Prediction Method // International Shipbuilding Progress. 1982. Vol. 29, № 335. P. 166–170.
15. Ya. Voitekunsky et al. Ship Theory. Reference book. In 3 vol. Vol. 1. Hydromechanics. Ship resistance. Marine propulsors. Leningrad: Sudostroyeniye, 1985. 764 p. (in Russian).

References

1. M. Lobachev, V. Novoselov, T. Saifullin, A. Taranov // Russian Supercomputer Days: Proceedings of International Conference. Moscow, MAKS Press, 2020. P. 60–73 (in Russian). URL: https://2020.russianscdays.org/files/2020/RuSCDays20_Proceedings.pdf (accessed on 13.09.2021).

16. V. Borusevich, G. Kanevsky, S. Kaprantsev, A. Klubnichkin, M. Lobachev. Evolution of propulsion performance prediction methods for carrier ships // Transactions of the Krylov State Research Centre, 2017. Vol. 4(382). P. 21–27 (in Russian). DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-21-28.

Сведения об авторах

Лобачев Михаил Павлович, к.т.н., начальник отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-45-99. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5669-9058>.

Новоселов Владимир Николаевич, ведущий инженер-программист ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5577-1708>.

Поляков Юрий Николаевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-67-56. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Рудниченко Алексей Андреевич, инженер I категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4567-7125>.

Сайфуллин Тимур Ильдарович, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1186-5897>.

Таранов Андрей Евгеньевич, к.т.н., начальник Суперкомпьютерного центра математического моделирования ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1325-3838>.

About the authors

Lobachev Mikhail P., Cand. Sci. (Eng), Head of Division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-45-99. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5669-9058>.

Novoselov Vladimir N., Leading software engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5577-1708>.

Polyakov Yury N., Cand. Sci. (Eng), Leading research scientist, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-67-56. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Rudnichenko Alexey A., Engineer 1st category, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4567-7125>.

Saifullin Timur I., Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: krylov@krylov.spb.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1186-5897>.

Taranov Andrey Ye., Cand. Sci. (Eng), Head of HPC-CFD Centre, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-19. E-mail: AE_Taranov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1325-3838>.

Поступила / Received: 16.08.21
Принята в печать / Accepted: 22.10.21
© Коллектив авторов, 2021