

Лаврищева Л.С., Новоселов В.Н.  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

## ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ МОДЕЛИ ГРЕБНОГО ВИНТА В ОДНОРОДНОМ ПОТОКЕ

Рассмотрена оптимизация формы модели гребного винта (ГВ) в однородном потоке на заданном режиме хода судна с целью повышения коэффициента полезного действия движителя. Разработана программа параметрического представления ГВ Vintgen, и создана технология оптимизации формы ГВ в однородном потоке, по итогам которой получен прирост КПД движителя на 1,5 % при строго заданных ограничениях.

**Ключевые слова:** численные методы, гребной винт, параметризация, оптимизация.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Лаврищева Л.С., Новоселов В.Н. Оптимизация формы модели гребного винта в однородном потоке. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; специальный выпуск 1: 75–83.

УДК 629.5.037.001.57

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-75-83

Lavrishcheva L., Novoselov V.  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## PROPELLER MODEL SHAPE OPTIMIZATION IN UNIFORM FLOW

The paper describes propeller model shape optimization under uniform flow conditions in the specified ship operation mode performed with intention to increase the propeller efficiency. Software for parametric representation of the Vintgen propeller is developed and propeller shape optimization technology in uniform flow conditions is suggested, resulting in a 1.5 % efficiency increase within strictly specified constraints.

**Key words:** numerical methods, propeller, parameterization, optimization.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Lavrishcheva L., Novoselov V. Propeller model shape optimization in uniform flow. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; special issue 1: 75–83 (in Russian).

UDC 629.5.037.001.57

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-S-I-75-83



## Введение

### Introduction

Оптимизацию можно считать вершиной инженерных компьютерных технологий. Для решения задач в этой области следует в максимальной степени задействовать математический аппарат, привлекать эффективные серверные платформы и последние достижения в области разработки программного обеспечения. Таким образом, оптимизация является одной из самых актуальных задач в промышленности, поэтому широко применяется в таких сферах, как авиация и космос, автомобилестроение, турбомашиностроение и судостроение.

Статья посвящена оптимизации в области судостроения, а именно разработке технологии оптимизации формы гребного винта (ГВ) с целью улучшения его КПД при строго заданных ограничениях по показателю упора на лопастях ГВ, момента на вале движителя и давления в области течения. Это весьма сложная задача по нескольким причинам: нет достаточного количества наработок и рекомендаций по созданию простых и эффективных технологических цепочек данного процесса, присутствует лишь общее, основанное на теории проектирования движителей, понимание о том, какие характеристики необходимо жестко зафиксировать, а какие можно и нужно варьировать и в каком диапазоне. Самое же главное – до недавнего времени вопрос параметризации движителей данного типа в CAD-системах (системах компьютерного проектирования) оставался открытым.

На сегодняшний день гребной винт – наиболее распространенный тип движителей в судостроении, состоящий из 3–7 лопастей, радиально установленных на одинаковом угловом расстоянии друг от друга на теле вращения – ступице.

Основной безразмерной кинематической характеристикой ГВ, определяющей режим его работы в жидкости является относительная поступь, которая находится по формуле

$$J = V_a / (nD),$$

где  $V_a$  – поступательная скорость ГВ, м/с;  $n$  – частота вращения ГВ;  $D$  – диаметр ГВ, м [1].

Кроме того, работу ГВ характеризуют такие величины, как упор и момент. Если их обезразмерить, получаются коэффициенты упора и момента ГВ:

$$K_T = T / (\rho n^2 D^4);$$

$$K_Q = Q / (\rho n^2 D^5),$$

где  $T$  – упор ГВ, Н;  $Q$  – момент ГВ, Нм;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $K_T$  и  $K_Q$  рассчитывались на лопастях и галтелях модели ГВ.

Коэффициент полезного действия винта определяется следующим образом:

$$\eta_0 = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi}.$$

## Создание параметрической модели гребного винта

### Development of propeller parametric model

В настоящее время получение цифровой модели ГВ сопряжено с большими трудностями. CAD-системы позволяют создать винт, но лишь из универсальных геометрических примитивов – сплайновых поверхностей и т.д. Соответственно, проектировщику нужно точно указать координаты каждой опорной точки. Возникает ситуация, когда один только процесс ввода точек чрезвычайно трудоемок, а их координаты нужно считать по отдельным формулам, о которых CAD-система ничего не знает. Получается, что без какого-либо дополнительного программирования проектировщику практически невозможно создать винт в разумные сроки, какой бы серьезной ни была CAD-система.

Программирование под CAD-систему очень ресурсоемко, почти не встречается на практике, но и оно не может избавить от ограничений. Если не рассматривать все отрицательные стороны зависимости от программных комплексов других стран и написать свое расширение, например, под Siemens NX, то даже такая уникальная технология будет иметь целый ряд критических недостатков. С одной стороны, здесь мы уже имеем цифровой винт по его стандартным характеристикам и, соответственно, все необходимое для его изготовления – чертежи, спецификации и т.д. Но для расчета обтекания требуется другая цифровая модель, и CAD-системы не могут ее отдать. Дело даже не в разнице форматов, все намного серьезнее: для численных расчетов нужны другие сетки. CAD-система строит сетки для визуализации, а не для расчетов, минимизируя количество треугольников. Так, прямоугольная пластина в CAD-системе – это два треугольника, а при расчетах она может быть разбита на тысячу примитивов, которые совсем не обязательно будут треугольниками. Вот такую сетку требуют расчетные системы на вход. Решение проблемы интеграции привело к появлению в расчетных системах математических ядер, и именно они стали обрести функционалом CAD, а не наоборот. Такой подход

привел к существенному удорожанию технологии, т.к. пользователь теперь платит за два математических ядра, причем в большинстве случаев одинаковых.

Именно таким образом решена проблема интеграции с CAD в расчетной системе Star-CCM+, но от проблем не избавило и это. Во-первых, появилась новая зависимость от программ иностранного производства, во-вторых, подготовка такой сетки требует длительной работы инженера. Циклы оптимизации ГВ должны проходить автоматически, т.е. ручное доведение каждой новой сетки недопустимо. Star-CCM+ имеет в своем арсенале возможность записывать действия пользователя в виде макроса, и это сильно помогает, но макросы не должны быть слишком сложными; в противном случае, как показала практика, поддержка их работоспособности в разных ситуациях и на разных версиях софта становится крайне непростой, а процент ошибок высок. Стоит также упомянуть, что в передаче данных между математическими ядрами участвует некий общий формат (IGES, STEP), а это увеличивает издержки и повышает риски.

Таким образом, видно, что для получения параметрической модели ГВ в рамках цикла оптимизации нет никаких гарантий даже в том случае, когда доступны самые дорогие коммерческие решения, под которые еще нужно серьезно программировать. Все вопросы решаются лишь в одном случае – когда пишется программа, способная заменить собой CAD-этап проектирования и создать расчетную сетку, экспортируемую в любой численный пакет, включая Open Foam. Созданная программа носит название Vintgen. Рассмотрим ее свойства более детально.

- Программа не зависит от других поставщиков ПО, в ней реализована своя математика, что также позволяет оперативно адаптироваться под конкретные практические ситуации.
- Vintgen принимает на вход формат описания винтов, распространённый в КГНЦ, и конвертирует в свой собственный формат.
- Разработан новый формат винтов, который описывает не только форму лопасти, но и все остальные характеристики, включая ступицу, расчетную сетку и пр.

Новый формат базируется на технологии Extensible Markup Language (XML). Внедрение этой технологии было отдельным большим проектом, что дало возможность не только описывать сам винт интуитивно понятным способом, но и максимально гибко описывать программу его оптимизации.

- Технология XML также позволяет строить объёмные базы данных винтов стандартным образом без использования какого-либо софта, опираясь

только на компактное текстовое описание винтов в файлах. Такие базы данных можно просматривать, например, в обычном интернет-браузере.

- Своя математика позволила получить твердотельную модель со всеми нужными деталями – поверхностью скругления переменного радиуса при примыкании лопасти к ступице, нарощенной поверхностью скругления на верхней кромке, не имеющей аналогов в CAD-системах, особому подходу к задней кромке, включая ее антиполюющие свойства, и т.д.
- Твердотельная модель имеет нужные ассоциативные связи, чтобы при изменении параметров правильно перестроить все детали и все свои сетки, которых, в отличие от CAD-системы, несколько, с последовательными превращениями одна в другую.
- Математика сплайновых поверхностей специально адаптирована под технологию Free Form Deformation, позволяющую менять форму лопасти так, что всегда будет получаться гладкая согласованная поверхность.
- Есть возможность гибко задавать стратегию изменения параметров при оптимизации – от S-образной деформации с четырьмя параметрами на кривую до одного параметра сдвига всей кривой. Если какие-либо параметры фиксированы (например, при примыкании к ступице), то это прописывается в стратегии оптимизации и существенно уменьшает общее количество параметров.
- Итоговая поверхностная сетка отдается через универсальный формат Star-CD. Эта сетка специально разбита на дополнительные поверхности у кромок винта, чтобы получить компактную объемную сетку без искажений формы.
- Vintgen – это 3D-программа, которая может управляться через интерпретатор. Именно так оптимизатор просит Vintgen принять новые параметры, создать винт, сохранить его расчетную сетку и скриншот. Эти команды просто прописываются как специальные инструкции XML без необходимости писать код на скриптовом языке. Vintgen самостоятельно отслеживает внесение изменений в файл параметров и запускает указанные инструкции.

Стоит также отметить тот факт, что в данный момент практически каждое решение, приведенное выше, не реализовано в традиционных коммерческих решениях, что выводит созданную технологию параметризации гребных винтов в разряд наукоемких инноваций.

## Численное моделирование обтекания гребного винта в однородном потоке

Numerical modeling of uniform flow around propeller

Для проведения численного моделирования выбрана модель движителя, для которой ранее были получены экспериментальные данные в опытовом бассейне Крыловского государственного научного центра. Форма рассмотренной модели ГВ показана на рис. 1, а его геометрические характеристики приведены в табл. 1.

В качестве рабочего инструмента использован коммерческий пакет вычислительной гидродинамики Star-CCM+ версии 11.06 фирмы Siemens. Построена неструктурированная гексаэдральная расчетная сетка, имеющая размерность 200 000 ячеек. Задача решена в стационарной постановке с применением осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса методом конечных объемов. В качестве модели турбулентности использована  $k-\omega$

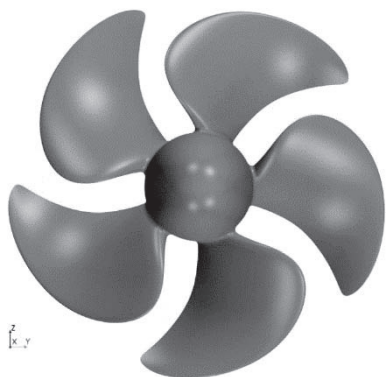


Рис. 1. Вид в плане исследованной модели ГВ

Fig. 1. Plan view of propeller model under study

Таблица 1. Геометрические характеристики модели ГВ

Table 1. Propeller model geometry

Характеристика	Значение
Диаметр модели $D$ , м	0,212
Число лопастей $Z$	5
Шаговое отношение $P/D$	1,294
Дисковое отношение $AE/A0$	0,742

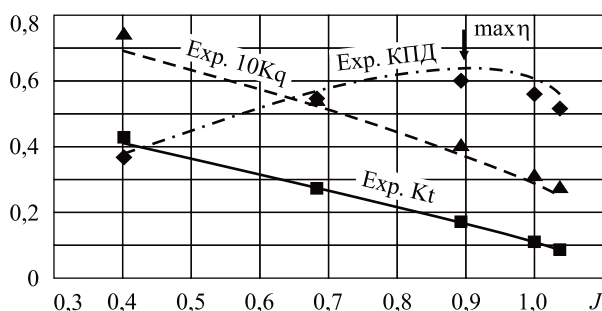


Рис. 2. Кривые действия модели ГВ. Сравнение расчета с экспериментальными данными

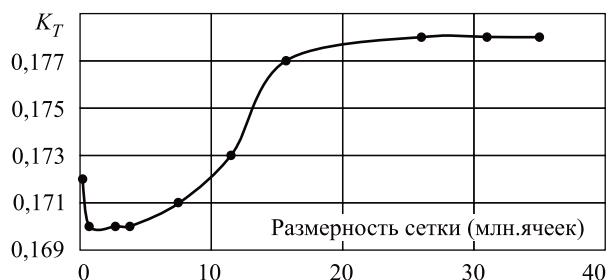
Fig. 2. Model propeller curves. Comparison of calculations and experimental data

SST-модель Ментера. Безразмерная толщина первого слоя сетки  $y^+$  лежит в диапазоне 30–120. В расчетах принята плотность воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , динамическая вязкость  $\mu = 1,141 \cdot 10^{-3} \text{ Па/с}$ . На входной границе расчетной области задавалась скорость потока, на выходной границе ставилось условие свободного вытекания, на остальных внешних границах – условие проскальзывания.

Для Star-CCM+ написана программа на языке Java с целью автоматизации процесса построения трехмерной расчетной сетки и расчета обтекания движителя. Данная программа впоследствии встроена в технологическую цепочку оптимизации. Таким образом, численное моделирование ГВ полностью автоматизировано и занимает минимальное время.

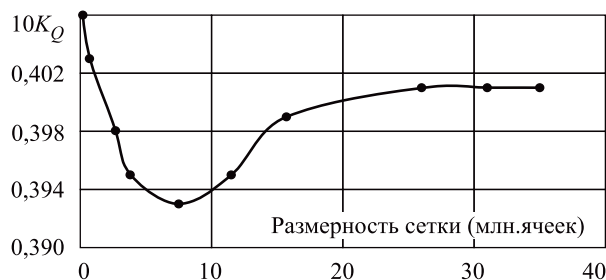
Значения коэффициентов упора, момента и КПД движителя на различных относительных поступях  $J$ , полученные в ходе проведения экспериментальных исследований и численного расчета, показаны на рис. 2. Варьирование относительной поступи достигалось путем изменения поступательной скорости ГВ.

Для оптимизации модели ГВ выбрана поступь с максимальным значением КПД. В данной точке отклонения от экспериментальных данных по  $K_T$  лежат в пределах 1,8 %, по  $K_Q$  – в пределах 8,3 %, по  $\eta_0$  – в пределах 3,7 %. Учитывая сравнительно небольшое для численного моделирования число расчетных ячеек, а также то, что целью является оптимизация формы модели ГВ, данные отклонения приняты приемлемыми для дальнейшей работы. Однако окончательные результаты оптимизации целесообразно проверять, используя расчетные сетки большей точности и модель ламинарно-турбулентного перехода [2, 3]. На рис. 3–5 показано, что сеточная независимость решения наступает на сетке в 26 миллионов ячеек.



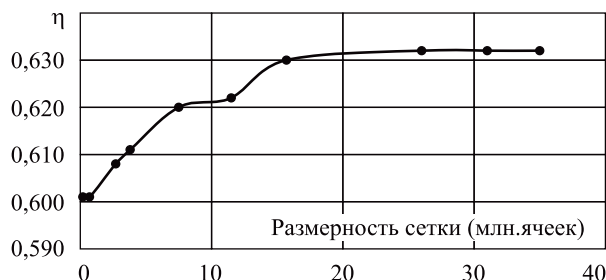
**Рис. 3.** Сеточная сходимость по коэффициенту упора модели ГВ

**Fig. 3.** Grid convergence for thrust coefficient of propeller model



**Рис. 4.** Сеточная сходимость по коэффициенту момента модели ГВ

**Fig. 4.** Grid convergence for torque coefficient of propeller model



**Рис. 5.** Сеточная сходимость по КПД модели ГВ

**Fig. 5.** Grid convergence for efficiency of propeller model

## Постановка задачи оптимизации

### Optimization process

Результаты оптимизации формы модели ГВ в однородном потоке на режиме максимального КПД были получены при условиях, приведенных в табл. 2.

### Управляемые параметры

Для улучшения гидродинамических характеристик модели ГВ изменению подвергались шаг и кривизна лопасти движителя. В данной задаче варьировались всего 5 параметров для ускорения процесса получения результатов оптимизации. Но, несмотря на выбор небольшого количества параметров лопасти, движитель имеет возможность принимать разнообразные формы. Выбор 3 точек для шага ГВ означает дугообразный характер изменения формы. Такой же характер деформации выбран и для кривизны, с той лишь разницей, что на максимальном радиусе нет смысла деформировать кривизну для данного винта. Это позволило управлять деформацией кривизны при помощи только двух параметров, установив третий в ноль.

### Ограничения при оптимизации

В проектировании движителей существует ряд ограничений, связанных с мощностью двигательной установки и запасами на кавитацию. Поэтому для соответствия выбранной модели ГВ реальным требованиям приняты следующие ограничения: упор на лопастях, создаваемый подъемной силой, не может быть меньше первоначального значения, крутящий момент на валу не должен превышать исходное значение момента, а минимальное давление в области

**Таблица 2.** Условия задачи оптимизации модели ГВ

**Table 2.** Conditions of propeller model optimization task

Целевая функция	Повышение $\eta_0$ на заданном режиме
Алгоритм оптимизации	Суррогатная оптимизация
Управляемые параметры	Шаг ГВ (3 параметра), кривизна лопасти ГВ (2 параметра)
Ограничения	$T \geq T_{\text{прототип}}$ ; $Q \leq Q_{\text{прототип}}$ ; $P_{\text{min}} \geq P_{\text{min прототип}}$ .

*Примечание:*  $P_{\text{min}}$  – минимальное давление в области вращения движителя, Па.

вращения движителя не должно быть ниже начального значения (для исключения кавитации).

## Процесс оптимизации

### Optimization process

Задача оптимизации была решена с помощью программного комплекса pSeven версии 6.10, из которого поступали команды на запуск расчета обтекания ГВ в Star-CCM+, считывались полученные значения для целевой функции (КПД) и ограничений (упора, момента и минимального давления). После этого происходил автоматический перенос полученных данных непосредственно в оптимизатор, который на основе алгоритма суррогатной оптимизации решал поставленную задачу. Принцип работы данного алгоритма состоит в следующем: исследование исходной функции начинается с построения обучающей выборки для формирования первоначальной суррогатной модели. Для того чтобы получить достаточно точную аппроксимацию, на этом этапе по возможности применяются априорные знания об исходной модели. Следующий шаг – построение суррогатной модели, которая аппроксимирует зависимость, реализуемую рассматриваемой физической моделью, с необходимой для последующего использования точностью. После создания первоначальной суррогатной модели начинается итеративный процесс. На каждой итерации выбираются новые точки в соответствии с некоторым критерием, в этих точках вычисляется изучаемая функция. Полученные точки добавляются к обучающей выборке, после чего обучается новая, в некотором смысле уточненная модель и процесс повторяется, пока не достигнут критерий остановки. Результатом исследования целевой функции по такому шаблону становится максимально точная суррогатная модель для дальнейшего использования, так называемая задача построения адаптивного плана эксперимента. На основе полученных данных осуществляется дальнейший поиск глобального минимума функции [4, 5]. Данный алгоритм имеет преимущество в скорости нахождения решения по сравнению с распространенными на сегодняшний день алгоритмами генетической оптимизации. pSeven по умолчанию автоматически выбирает количество запусков на планирование эксперимента и поиск оптимума, исходя из заданного количества параметров, целевых функций, ограничений и степени глобализации самого алгоритма. В нашем случае по умолчанию было выбрано 188 запусков.

По результатам разработки и автоматизации технологии инженерной оптимизации ГВ стало понятно, что очень важно обеспечение непрерывного взаимодействия нескольких программных продуктов. Как правило, это связка «CAD-продукт – CFD-пакет – программа оптимизации». Данную задачу успешно решает pSeven, являясь не только «носителем» алгоритма оптимизации, но и мощной программной платформой для создания рабочей «цепочки» процесса и анализа полученных данных. Кроме того, эта технология является кроссплатформенной. Переход с локальной машины (ОС Windows) на удаленную машину (ОС Linux) осуществляется в автоматическом режиме в рамках каждого запуска оптимизатора. Таким образом, pSeven и Vintgen работают на локальной Windows машине пользователя, а расчет обтекания модели ГВ происходит в Star-CCM+ на удаленной Linux машине.

## Результаты оптимизации

### Optimization results

Результаты оптимизации формы модели ГВ в однородном потоке представлены в табл. 3 в абсолютных и относительных величинах ( $\Delta P_{\min}$ ,  $\Delta K_T$ ,  $\Delta 10K_Q$ ,  $\Delta \eta_0$ ). На рис. 6 показан профиль сечения лопасти ГВ на относительном радиусе  $r/R=0,7$  до и после оптимизации.

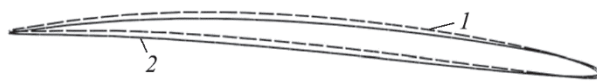
В табл. 4 представлена статистика работы оптимизатора и суперкомпьютера для решения данной задачи на грубой расчетной сетке. Как видно из таблицы, результата на сетке такого рода можно добиться в рамках одного рабочего дня, при этом управляя небольшим числом параметров и удовлетворяя всем заданным ограничениям.

**Таблица 3.** Результаты оптимизации формы модели ГВ

**Table 3.** Results of propeller model shape optimization

	Начальные значения	Результат оптимизации	Сравнение, %
$P_{\min}$	-135,6	-128,03	+5,9
$K_T$	0,172	0,176	+2,3
$10K_Q$	0,4064	0,4061	-0,1
$\eta_0$	0,601	0,616	+1,5

Примечание:  $\Delta P_{\min} = [(P_{\min \text{ opt}} - P_{\min}) / P_{\min}] \cdot 100\%$ ;  
 $\Delta K_T = [(K_{T \text{ opt}} - K_T) / K_T] \cdot 100\%$ ;  
 $\Delta 10K_Q = [(10K_{Q \text{ opt}} - 10K_Q) / 10K_Q] \cdot 100\%$ ;  
 $\eta_0 = (\eta_0 \text{ opt} - \eta_0) \cdot 100\%$ .



**Рис. 6.** Профиль лопасти модели ГВ на относительном радиусе  $r/R=0,7$  до (1) и после (2) оптимизации

**Fig. 6.** Propeller model blade section at  $r/R = 0.7$  before (1) and after (2) optimization

**Таблица 4.** Ресурсы, затраченные на оптимизацию  
**Table 4.** Resources used for optimization

Время, затраченное на 1 запуск	~1,5 минуты
Количество запусков	188
Общее время оптимизации формы ГВ	~5 часов
Количество расчетных узлов	20

#### Сеточная сходимость по оптимизации

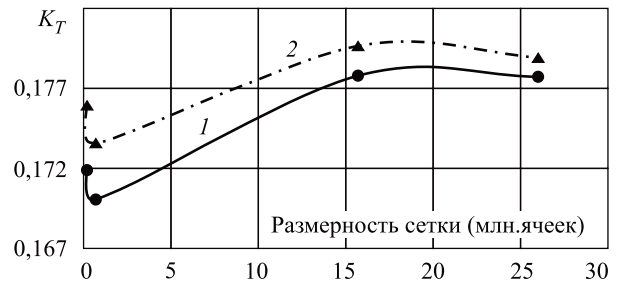
Проведено исследование влияния качества расчетной сетки на получаемые решения по основным гидродинамическим характеристикам в результате оптимизации. На рис. 7–9 показаны значения  $K_T$ ,  $10K_Q$  и  $\eta_0$ . Оптимизация была проведена при тех же условиях на сетках размерностью 700 тысяч, 16 миллионов и 26 миллионов расчетных ячеек. На графиках можно заметить, что коэффициент упора  $K_T$  увеличился, а коэффициент момента  $10K_Q$  уменьшился на всех сетках. В итоге КПД ГВ возрос в среднем на 1,3 %. Подробно результаты изменения гидродинамических характеристик движителя после оптимизации приведены в табл. 5.

#### Исследование возможности экономии ресурсов суперкомпьютера

Оптимизация с применением методов вычислительной гидродинамики как правило является очень ресурсоемким процессом, требующим по сравнению со стандартным расчетом гораздо больших затрат по времени. В связи с этим была исследована возможность экономии ресурсов суперкомпьютера в рамках решения данной задачи. Алгоритм исследования состоял в следующем: геометрическая модель ГВ, полученная в результате оптимизации на грубой сетке (200 000 ячеек), была посчитана на 700-тысячной, 16-миллионной и 26-миллионной сетках. На рис. 10 видно, что кривая оптимизирован-

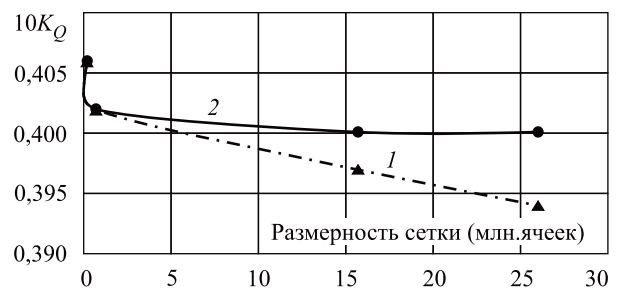
ного ГВ лежит выше в среднем на 1,5 %, чем кривая КПД исходного движителя. Подробно значения исходного и оптимального КПД на различных расчетных сетках представлены в табл. 6.

На рис. 11, 12 показано распределение параметров шага и кривизны модели ГВ по относительным радиусам  $r/R$ . Можно заметить, что кривые оптимизированных ГВ лежат близко друг к другу и имеют одинаковый характер распределения. Это означает, что оптимизатор подобрал близкие по значениям параметры ГВ и, следовательно, появилась возможность проводить оптимизацию на грубой расчетной сетке, а результат пересчитывать на подробную сетку, используя всего один расчет обтекания вместо чем сотни подобных расчетов. Таким образом, экономится значительное количество ресурсов суперкомпьютера и оптимизация ГВ становится доступнее.



**Рис. 7.** Сеточная сходимость по оптимизации для коэффициента упора модели ГВ: 1 – коэффициент упора исходного ГВ; 2 – коэффициент упора оптимизированного ГВ

**Fig. 7.** Grid convergence for optimization in terms of propeller model thrust coefficient: 1 – initial propeller model; 2 – optimized propeller model



**Рис. 8.** Сеточная сходимость по оптимизации для коэффициента момента модели ГВ: 1 – коэффициент момента оптимизированного ГВ; 2 – коэффициент момента исходного ГВ

**Fig. 8.** Grid convergence for optimization in terms of propeller model torque coefficient: 1 – optimized propeller model; 2 – initial propeller model

**Таблица 5.** Результаты оптимизации формы модели ГВ на различных расчетных сетках

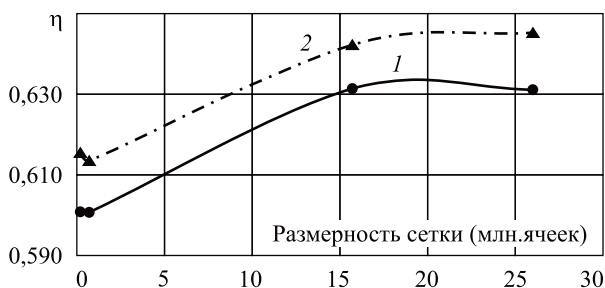
**Table 5.** Results of propeller model shape optimization using various computational grids

Размерность сетки (млн. ячеек)	$K_T$ , %	$10K_Q$ , %	$\eta$ , %
0,2	+2,4	-0,2	+1,5
0,7	+2,1	-0,1	+1,3
16	+1,1	-1,6	+1,1
26	+0,7	-3,6	+1,4

**Таблица 6.** Сравнение КПД исходной модели ГВ и оптимизированных вариантов

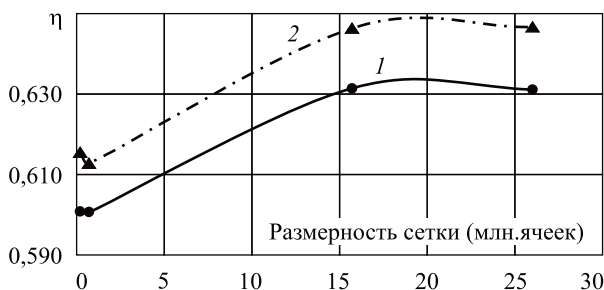
**Table 6.** Propeller efficiency comparison for initial and optimized propeller model versions

Размерность сетки (млн. ячеек)	КПД исходного ГВ	КПД оптимизированного ГВ	Сравнение, %
0,2	0,601	0,616	1,5
0,7	0,601	0,613	1,2
16	0,631	0,646	1,5
26	0,631	0,647	1,6



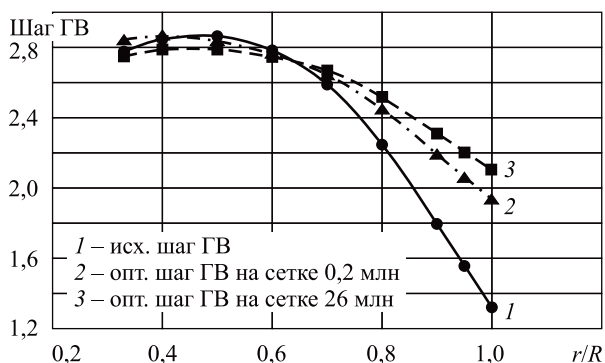
**Рис. 9.** Сеточная сходимость по оптимизации для КПД модели ГВ: 1 – исходный ГВ; 2 – оптимизированный ГВ

**Fig. 9.** Grid convergence for optimization in terms of propeller model efficiency: 1 – initial propeller model; 2 – optimized propeller model



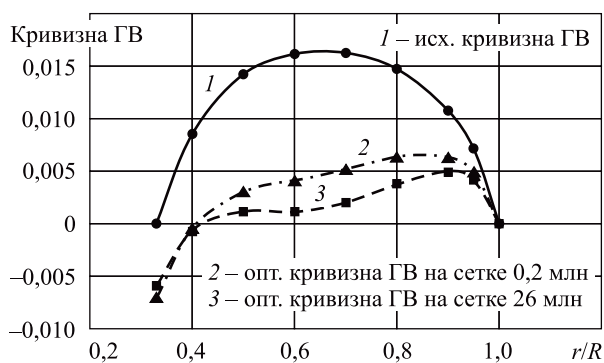
**Рис. 10.** Сравнение КПД исходного ГВ (1) и оптимизированного (2) варианта на грубой сетке

**Fig. 10.** Propeller efficiency comparison for initial (1) and optimized (2) propeller version in coarse grid



**Рис. 11.** Распределение параметров шага ГВ по относительным радиусам  $r/R$

**Fig. 11.** Distribution of propeller pitch parameters at  $r/R$



**Рис. 12.** Распределение параметров кривизны ГВ по относительным радиусам  $r/R$

**Fig. 12.** Distribution of propeller camber parameters at  $r/R$



## Заключение

### Conclusion

В рамках создания технологии автоматизированной инженерной оптимизации формы модели ГВ в однородном потоке была разработана программа параметризации под названием Vintgen, позволяющая получать ГВ по распределениям его стандартных характеристик (шаг, кривизна, саблевидность, откидка и т.д.), а также обтекаемую форму ступицы, которая управляется своими параметрами. Оработана и автоматизирована технология численного моделирования обтекания геометрической модели ГВ в однородном потоке. С целью сопоставления результатов с экспериментальными данными проведена серия расчетов, в ходе которых получена удовлетворительная точность для дальнейшей оптимизации на грубой расчетной сетке, а также установлена сеточная независимость решения на сетке в 26 миллионов ячеек. Представлен оптимизационный расчет, цель которого – повышение КПД ГВ на заданном режиме. В результате прирост вышеупомянутой характеристики для модели ГВ составил 1,5% при строго заданных ограничениях по упору, моменту и минимальному давлению в области вращения движителя. На основе полученных данных оптимизированного ГВ на грубой сетке представлена сеточная сходимость по оптимизации и изучена возможность экономии ресурсов суперкомпьютера. Установлено, что оптимизатор подобрал оптимальные параметры геометрической модели ГВ на грубой сетке, а следовательно, время на оптимизацию можно сократить в несколько раз. Благодаря отработанной и автоматизированной технологии оптимизации обтекания ГВ, а также правильному выбору как самого алгоритма оптимизации, так и степени его глобализации, получена модель ГВ, которая имеет больший КПД, нежели начальная, а также удовлетворяет всем заданным ограничениям.

## Библиографический список

### References

1. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые движители. Л.: Судостроение, 1988. С. 18–26, 33–40, 223–227. [L. Artyushkov, A. Achkinadze, A. Rusetsky. Ship propulsors. L.: Sudostroenie, 1988. P. 18–26, 33–40, 223–7. (in Russian)].

2. Таранов А.Е., Лобачев М.П. Определение гидродинамических характеристик моделей гребных винтов с учетом ламинарно-турбулентного перехода // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 90 (374). С. 47–54. [A. Taranov, M. Lobachev. Determination of hydrodynamic characteristics of propeller models taking into account laminar/turbulent transition. Transaction of Krylov State Research Centre. 2015; 90(374): 47–54. (in Russian)].
3. Таранов А.Е. Сеточная сходимость в расчетах обтекания модели гребного винта ледокола // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 90 (374). С. 55–61. [A. Taranov. Grid convergence in computation of flow around icebreaker's propeller model / Transaction of Krylov State Research Centre. 2015; 90(374): 55–61. (in Russian)].
4. Назаренко А.М. Эффективный алгоритм многокритериальной суррогатной оптимизации. Выпускная квалификационная работа на степень магистра. М.: Московский физико-технический институт (государственный университет). 2013. С. 21–22. [A. Nazarenko. Effective algorithm for multi-criterion surrogate-based optimization. Master's thesis. M: Moscow Physical Technical Institute (State University). 2013. P. 21–2. (In Russian)].
5. Zhong-Hua Han Zhong-H., Zhang Ke-S. Surrogate-Based Optimization. InTech. 2012. стр. 333–362.

## Сведения об авторах

Лаврищева Любовь Сергеевна, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: Санкт-Петербург, 196158, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 748-63-19; E-mail: L\_Lavrishcheva@ksrc.ru.

Новоселов Владимир Николаевич, ведущий инженер-программист ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: Санкт-Петербург, 196158, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 748-63-19; E-mail: V\_Novoselov@ksrc.ru.

## About the authors

Lavrishcheva L., Engineer, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 748-63-19; E-mail: L\_Lavrishcheva@ksrc.ru.

Novoselov V., Leading Software Engineer Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 748-63-19; E-mail: V\_Novoselov@ksrc.ru.

