

## Решение оптимизационной задачи для модели гребного винта регулируемого шага в однородном потоке

*Л. С. Лаврищева*

Крыловский государственный научный центр,  
Российская Федерация, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44

**Для цитирования:** *Лаврищева Л. С.* Решение оптимизационной задачи для модели гребного винта регулируемого шага в однородном потоке // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. 2018. Т. 5 (63). Вып. 1. С. 139–146. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2018.115>

В статье рассмотрена отработка технологии численного моделирования обтекания модели гребного винта регулируемого шага (ВРШ) и его оптимизация в однородном потоке. На первом этапе работы получена трехмерная расчетная сетка, а также полностью автоматизирован процесс работы в программном комплексе Star-CCM+ в ходе решения данной задачи. На втором этапе разработана технология оптимизации ВРШ при строго заданных ограничениях, по итогам которой получен удовлетворительный прирост коэффициента полезного действия движителя. Проведен анализ полученных результатов и построены графики сравнения экспериментальных данных с численным расчетом по основным гидродинамическим характеристикам ВРШ. Кроме того, исследовано влияние степени глобализации алгоритма суррогатной оптимизации на качество и скорость нахождения решения в рамках данной постановки задачи. Результаты работы получены в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и используются для решения прикладных задач судостроения.

*Ключевые слова:* гребной винт, численное моделирование, оптимизация.

**1. Введение.** На сегодняшний день оптимизация является одной из самых актуальных областей как в прикладной инженерной деятельности, так и в фундаментальных исследованиях. Высокий интерес к предмету возник с развитием и ростом мощности вычислительной техники, а также с появлением имитационного программного обеспечения. Специалистами со всего мира накоплен богатый опыт в разработке методов, алгоритмов и моделей для наиболее эффективного решения все более возрастающих по сложности задач.

Несмотря на большое количество методов оптимизации и использование новейших инженерных программных комплексов, оптимизация такого объекта как гребной винт (ГВ) все еще представляет большую сложность. Это связано, в первую очередь, с большим числом возможных параметров на лопасти ГВ (более 100) и невозможностью получить твердотельную геометрическую модель с обтекателем и гребным валом в большинстве пакетов моделирования. В статье [1] подробно рассмотрена технология создания параметрической модели ГВ, а также оптимизации, однако численный расчет проведен без учета вязкости, что является серьезным упрощением постановки задачи.

В данной работе проведена отработка технологии численного моделирования обтекания модели гребного винта регулируемого шага для последующей его оптимизации при заданном режиме работы без учета влияния корпуса судна с целью увеличения КПД движителя. Решение рассматриваемой задачи и внедрение технологии оптимизации представляет определенную сложность, которая связана с наличием параметрической модели лопасти гребного винта, получением экономичной, но достаточной для сравнения с экспериментом расчетной сетки, а также выполнением кроссплатформенной интеграции нескольких программных продуктов с использованием суперкомпьютера.

Гребной винт является наиболее распространенным типом движителей в судостроении и состоит из 3–7 лопастей, радиально установленных на одинаковом угловом расстоянии друг от друга на теле вращения, называемом ступицей. Лопасти гребного винта представляют собой крылья малого удлинения. Данный тип движителей подразделяется на две группы: ГВ фиксированного шага (ВФШ), лопасти которых неподвижно закреплены на ступице, и ГВ регулируемого шага (ВРШ), лопасти которых с целью регулирования шага могут во время их работы поворачиваться относительно осей, перпендикулярных к оси гребного вала. Гребные винты типа ВРШ обладают рядом преимуществ по сравнению с ВФШ, а именно: упрощается возможность реверсирования судна (возможность устанавливать нереверсивные двигатели), улучшаются маневренные качества судна (за счет создания разных упоров на правом и левом ГВ на малой скорости хода). Этот тип гребных винтов также позволяет использовать полную мощность двигателя на всех режимах хода судна [2].

Основной безразмерной кинематической характеристикой ГВ, определяющей режим его работы в жидкости, является относительная поступь, которая дается формулой

$$J = \frac{v_a}{nD}, \quad (1)$$

где  $v_a$  — поступательная скорость гребного винта (м/с),  $n$  — частота вращения ГВ (об/с),  $D$  — диаметр ГВ (м).

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

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad (2)$$

где  $T$  — упор гребного винта (Н),  $Q$  — момент гребного винта (Нм),  $\rho$  — плотность жидкости (кг/м<sup>3</sup>). Упор и момент рассчитываются на лопастях и галтелях модели гребного винта.

Коэффициент полезного действия винта определяется следующим образом:

$$\eta_0 = \frac{K_T}{K_Q} \frac{J}{2\pi}. \quad (3)$$

**2. Численное моделирование обтекания модели гребного винта регулируемого шага.** Для проведения численных расчетов была выбрана модель ВРШ (рис. 1), для которой ранее были получены экспериментальные данные в бассейне Крыловского государственного научного центра.

В программе Vintgen версии 1.07 (разработана в Крыловском государственном научном центре) построена геометрическая модель данного движителя в соответствии с безразмерными распределениями хорды, кривизны, толщины, шага, саблевидности, откидки лопасти винта на относительных радиусах. Построение трехмерной

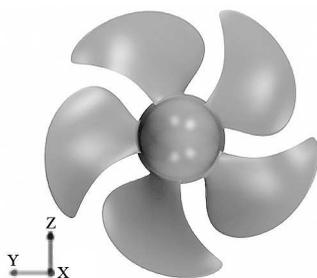


Рис. 1. Общий вид геометрической модели ВРШ.

неструктурированной гексаэдральной сетки (рис. 2) и расчет обтекания модели выполнены в программном комплексе Star-CCM+ версии 11.06.010. Данная сетка имеет размерность 200 000 расчетных ячеек, что является крайне экономичным и выгодным условием для дальнейшей оптимизации. Однако такая размерность годится только для сопоставительных расчетов, что будет подтверждено проведением сеточной сходимости в дальнейших исследованиях.

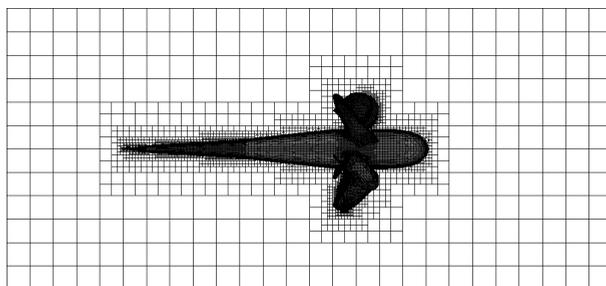


Рис. 2. Расчетная сетка. Вид в диаметральной плоскости.

Задача решена в стационарной постановке с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса (Reynolds-Averaged Navier—Stokes — RANS) методом конечных объемов. В качестве модели турбулентности использована  $k-\omega$ -SST-модель Ментера. Безразмерная толщина первого слоя сетки  $y^+$  лежит в диапазоне 30–120. В расчетах приняты значения: 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+ с целью автоматизации процесса расчета и дальнейшей оптимизации подготовлена специальная программа на языке Java, в которой последовательно запускается процесс построения расчетной сетки, расчет обтекания и вывод значения целевой функции. Таким образом, процесс численного моделирования модели ВРШ является полностью автоматизированным и занимает минимальное количество времени. Получены результаты расчетов для  $K_T$ ,  $K_Q$  и  $\eta_0$  на различных поступях  $J$ . Варьирование относительной поступи достигалось путем изменения поступательной скорости гребного винта. Характерные числа Рейнольдса для данной задачи лежат в диапазоне от  $3 \cdot 10^5$  до  $8 \cdot 10^5$ . На рис. 3–5 представлены результаты сравнения экспериментальных значений данных коэффициентов с расчетными.

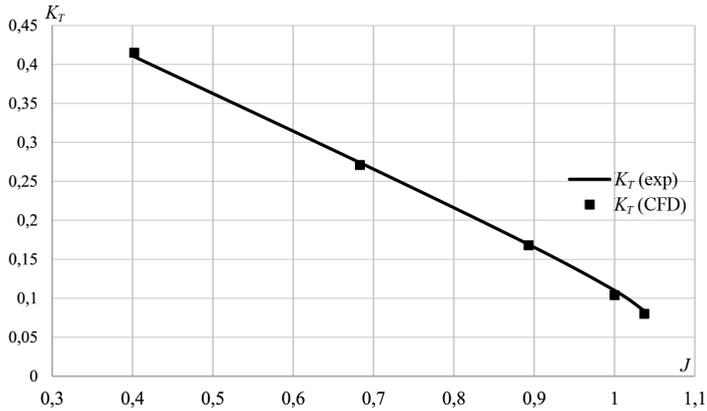


Рис. 3. Зависимость коэффициента упора от поступи гребного винта.

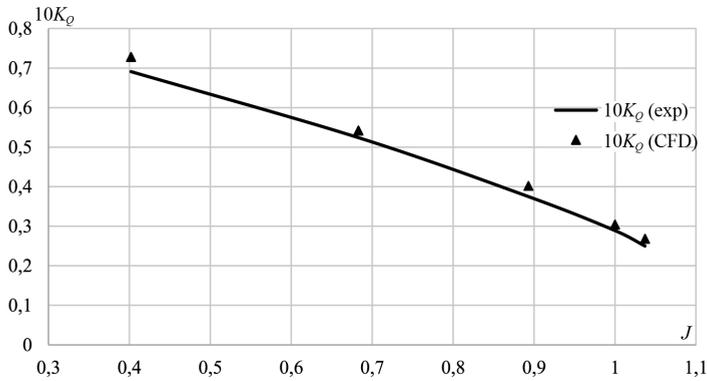


Рис. 4. Зависимость коэффициента момента от поступи гребного винта.

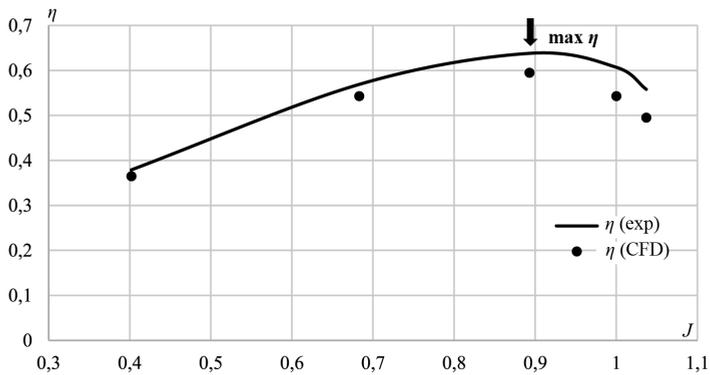


Рис. 5. Зависимость коэффициента полезного действия от поступи гребного винта.

Для оптимизации модели ВРШ выбрана поступь с максимальным  $\eta_0$ . В данной точке отклонения по  $K_T$  от экспериментальных данных 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 количество расчетных ячеек, а также то, что целью является оптимизация ГВ, данные отклонения приняты приемлемыми для дальнейшей работы. Окончательные результаты оптимизации целесообразно проверять, используя расчетные сетки, обеспечивающие большую точность. В работе [3] показано, что для достижения требуемой для практического использования точности размерность расчетных сеток лежит в диапазоне от 8,5 до 13 млн ячеек.

**3. Постановка задачи и описание процесса оптимизации модели гребного винта регулируемого шага.** Рассмотрим процесс оптимизации модели гребного винта на режиме максимального значения  $\eta_0$  без учета влияния корпуса судна при условиях, представленных в табл. 1, где  $P_{\min}$  — минимальное давление в области вращения движителя (Па).

Таблица 1. Условия оптимизации

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

*Управляемые параметры.* Для улучшения гидродинамических характеристик модели ВРШ изменению подвергались шаг и кривизна лопасти движителя. Выбор столь небольшого числа параметров на каждой из кривых обусловлен работой программы Vintgen, строящей параметрическую модель ГВ, а именно, на каждой кривой, описывающей лопасть гребного винта с помощью специальных алгоритмов выделено от двух до четырех параметров, которые можно менять. Таким образом, было получено 23 параметра на гребной винт, и при этом имеется возможность получать огромное разнообразие вариантов геометрий.

*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 лопастей не может быть менее первоначального значения, крутящий момент не выше первоначального значения, минимальное давление в области не ниже первоначального значения (для исключения кавитации).

Задача оптимизации была решена с помощью программного комплекса rSeven версии 6.10, из которого выполнялись последовательные запуски расчета обтекания гребного винта в пакете гидродинамики Star-CCM+, считывались значения целевой функции и ограничений специальным текстовым блоком. После этого полученные значения передавались непосредственно в оптимизатор, который на основе алгоритма суррогатной оптимизации решал поставленную задачу. Особенность работы 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 (например, предположения об уровне шума). Следующий шаг — построение суррогатной модели, которая аппроксимирует зависимость, реализуемую рассматриваемой физической моделью, с необхо-

димой 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 будет 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. Комплекс pSeven по умолчанию автоматически выбирает количество запусков на планирование эксперимента и поиск оптимума, исходя из заданного количества параметров, целевых функций, ограничений и степени глобализации (Global Phase Intensity — GPI) самого алгоритма. В нашем случае по умолчанию было выбрано 188 запусков. При этом степень глобализации алгоритма также по умолчанию выбрана 0,5. Данный параметр может принимать значения от 0 до 1. С накоплением опыта стало понятно, что правильный выбор степени глобализации может значительно сократить время на поиск оптимума функции. Поэтому в рамках данной работы проведены дополнительные исследования влияния данной опции на решение (табл. 2, 3).

**4. Результаты оптимизации.** Проведена серия расчетов, результаты которых представлены в табл. 2 и 3. В скобках показаны изменения значений  $\Delta P_{\min}$ ,  $\Delta K_T$ ,  $\Delta 10K_Q$ , а также  $\Delta \eta_0$  в относительных величинах:

$$\Delta P_{\min} = \frac{P_{\min \text{ opt}} - P_{\min}}{P_{\min}}, \quad \Delta K_T = \frac{K_{T \text{ opt}} - K_T}{K_T},$$

$$\Delta 10K_Q = \frac{K_{Q \text{ opt}} - K_Q}{K_Q}, \quad \Delta \eta_0 = (\eta_{0 \text{ opt}} - \eta_0) \cdot 100\%.$$

Таблица 2. Результаты оптимизации

	До оптимизации	После оптимизации (GPI 0,1)	После оптимизации (GPI 0,5)	После оптимизации (GPI 0,9)
$P_{\min}$	-135,60	-128,03 (+5,9%)	-129,50 (+4,7%)	-133,20 (+1,8%)
$K_T$	0,172	0,176 (+2,3%)	0,175 (+1,7%)	0,174 (+1,3%)
$10K_Q$	0,4064	0,4061 (-0,1%)	0,4062 (-0,1%)	0,4063 (-0,04%)
$\eta_0$	0,601	0,616 (+1,5%)	0,611 (+1,1%)	0,610 (+0,9%)

Таблица 3. Количество выбранных по умолчанию запусков оптимизатора при различных степенях глобализации

GPI 0,1	GPI 0,5	GPI 0,9
64	188	300

Как видно из табл. 3, выбор степени глобализации повлиял на результат. Значение GPI = 0,1 соответствует минимальной степени глобализации алгоритма опти-

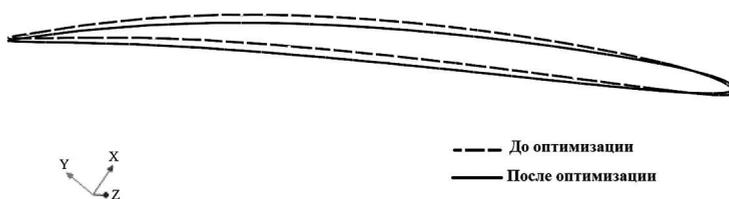


Рис. 6. Профиль лопасти модели гребного винта на относительном радиусе  $r/R = 0,7$  до и после оптимизации ( $GPI = 0,5$ ).

мизации, и поиск экстремума целевой функции фактически сводится к локальным методам. Это удобно в рамках данной задачи, потому что мы имеем дело с целевой функцией, где каждое новое значение расположено близко от предыдущего и отличается, как правило, лишь в сотых и тысячных долях от начального. Полученные результаты оптимального значения целевой функции  $\eta_0$  при  $GPI = 0,1$  на 0,4% больше, чем при  $GPI = 0,5$ , кроме того, экономия времени значительна из-за малого количества запусков оптимизатора. Расчет с  $GPI = 0,9$  показал результаты несколько хуже двух предыдущих. Это связано с излишней глобализацией алгоритма для данной постановки задачи.

На рис. 6 показано положение сечения профиля на относительном радиусе лопасти 0,7.

**5. Заключение.** Отработана и автоматизирована технология численного моделирования геометрической модели гребного винта регулируемого шага без учета влияния корпуса судна. Проведена серия расчетов с целью сопоставления результатов с экспериментальными данными. Получена удовлетворительная точность для дальнейшей оптимизации на грубой расчетной сетке. Проведена серия оптимизационных расчетов с целью повысить КПД гребного винта на заданном режиме и при заданных ограничениях. Изучено влияние настройки опции степени глобализации оптимизационного алгоритма на итоговое решение. Благодаря отработанной и автоматизированной технологии численного расчета обтекания гребного винта, а также правильному выбору как самого алгоритма оптимизации, так и степени его глобализации получена модель гребного винта, который имеет больший КПД нежели начальная модель, а также удовлетворяет всем заданным ограничениям.

## Литература

1. Foeth E.-J. Propeller optimization using an unsteady Boundary-Element Method // Fourth international symposium on marine propulsors. 2015. P. 27–32.
2. Артюшков Л. С., Ачкинадзе А. Ш., Русецкий А. А. Судовые движители. Л.: Судостроение. 1988. 296 с.
3. Таранов А. Е., Лобачев М. П. Определение гидродинамических характеристик моделей гребных винтов с учетом ламинарно-турбулентного перехода // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. С. 47–54.
4. Назаренко А. М. Эффективный алгоритм многокритериальной суррогатной оптимизации: вып. квал. раб. маг. М., 2013. 52 с. URL: [https://www.datadvantage.net/assets/files/publications/Nazarenko\\_thesis.pdf](https://www.datadvantage.net/assets/files/publications/Nazarenko_thesis.pdf) (дата обращения 03.01.2018).

5. Han Zh.-H., Zhang K.-S. Surrogate-Based Optimization. In: Real-World Applications of Genetic Algorithms. London: InTech, 2012. P. 343–362.

Статья поступила в редакцию 2 августа 2017 г.; рекомендована в печать 21 сентября 2017 г.

Контактная информация:

Лаврищева Любовь Сергеевна — аспирант; [liubovlavrishcheva@gmail.com](mailto:liubovlavrishcheva@gmail.com)

## Solution of the optimization problem of the model of variable pitch propeller in a uniform stream

L. S. Lavrishcheva

Krylov state research institute, Moskovskoe shossee, 44, St. Petersburg, 196158, Russian Federation

**For citation:** Lavrishcheva L. S. Solution of the optimization problem of the model of variable pitch propeller in a uniform stream. *Vestnik SPbSU. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2018, vol. 5 (63), issue 1, pp. 139–146. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2018.115>

The paper considers the development of numerical modeling of the flow around the variable pitch propeller (VPP) and its subsequent optimization without the influence of ship hull. In the first step of the work, a three-dimensional computational grid has been obtained, and a routine work in Star-CCM+ has been automated. In the second step the technology of the optimization VPP with strictly defined constraints has been developed. As a result, the satisfactory increase in the efficiency of the propeller has been obtained. The analysis of the results has been carried out and the comparison graphs of experimental data with numerical calculation for the main hydrodynamic characteristics have been constructed. In addition, the influence of the globalization degree of the surrogate optimization algorithm on the quality and the speed of finding a solution within the task definition has been investigated. The results of the work have been obtained in Krilov state research institute (KSRI) and are being used in the applied tasks in shipbuilding.

*Keywords:* propeller, numerical modeling, optimization.

## References

1. Foeth E.-J., “Propeller optimization using an unsteady Boundary-Element Method”, *Fourth international symposium on marine propulsors*, 27–32 (2015).
2. Artiushkov L. S., Achkinadze A. Sh., Rusetskii A. A., *Ship propulsors* (Sudostroenie Publ., Leningrad, 1988, 296 p.) [in Russian].
3. Taranov A. E., Lobachev M. P., “Determination of the hydrodynamic characteristics of the propeller models with considering the laminar-turbulent transition”, *Proceedings of the Krylov State Research Center*, 47–54 (2015) [in Russian].
4. Nazarenko A. M., *Effective algorithm for multicriteria surrogate optimization* (master’s thesis, Moscow, 2013, 52 p.). Available at: [https://www.dataadvance.net/assets/files/publications/Nazarenko\\_thesis.pdf](https://www.dataadvance.net/assets/files/publications/Nazarenko_thesis.pdf) (accessed January 3, 2018) [in Russian].
5. Han Zh.-H., Zhang K.-S., *Surrogate-Based Optimization*. In: *Real-World Applications of Genetic Algorithms* (InTech Publ., London, 2012, pp. 343–362).

Author’s information:

Lavrishcheva Liubov S. — [liubovlavrishcheva@gmail.com](mailto:liubovlavrishcheva@gmail.com)