

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-49-54  
УДК 629.5.036

М.П. Лобачев , А.А. Рудниченко , Т.И. Сайфуллин, А.Е. Таранов   
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДОВ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОДОМЕТНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ

**Объект и цель научной работы.** Объектами исследования являются катера и водометные движители. Цель работы – проектирование формы рабочего колеса водометного движителя методами суперкомпьютерной оптимизации под заданный режим эксплуатации с последующей валидацией результатов на ходовых испытаниях.

**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 рабочего колеса производится в программе BladePlus, разработанной в Крыловском государственном научном центре. Для определения гидродинамических характеристик водометного движителя 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.** В ходе оптимизационных исследований получены новые формы рабочих колес, спрямляющих аппаратов и проточной части водометных движителей. Полученные решения характеризуются повышенной по сравнению с прототипом эффективностью, достигаемой за счет повышения упора движительного комплекса и снижения сопротивления проточной части при сохранении высоких кавитационных характеристик. Расчетные гидродинамические характеристики водометных движителей и прогноз достижимой скорости хода катеров подтверждены результатами заводских ходовых испытаний.

**Заключение.** Использование методов суперкомпьютерной оптимизации позволило успешно начать работы по созданию отечественного типоряда водометных движителей для катеров, не уступающего по характеристикам признанным зарубежным аналогам.

**Ключевые слова:** численное моделирование, оптимизация, параметрическая модель, водометный движитель.  
*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-49-54  
UDC 629.5.036

M. Lobachev , A. Rudnichenko , T. Saifullin, A. Taranov   
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## INTRODUCTION OF SUPERCOMPUTER-BASED OPTIMIZATION METHODS TO WATERJET DESIGN

**Object and purpose of research.** This study discusses fast boats and waterjet propulsors. The purpose is to design a waterjet impeller shape to required conditions by means of supercomputer-based optimization with further validation of results at sea trials.

**Materials and methods.** The optimization process is governed by a Russian software package pSeven. The computation core is Star CCM+ (Siemens). Parametric 3D model of the impeller is generated in BladePlus software (in-house KSRC

*Для цитирования:* Лобачев М.П., Рудниченко А.А., Сайфуллин Т.И., Таранов А.Е. Внедрение методов суперкомпьютерной оптимизации в процесс проектирования водометных движителей. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 1(399): 49–54.

*For citations:* Lobachev M., Rudnichenko A., Saifullin T., Taranov A. Introduction of supercomputer-based optimization methods to waterjet design. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 1(399): 49–54 (in Russian).

development). Hydrodynamic parameters of waterjet are calculated as per CFD methods. Viscous flow parameters are found through the control-volume solution of unsteady Reynolds equations (URANS) closed by the bi-parametric semi-empirical turbulence model.

**Main results.** The optimization studies yielded new shapes for impellers, stators and flow parts of waterjets. These solutions are more efficient than the prototype thanks to greater thrust of the propulsion system and lower resistance of the flow part without prejudice to good cavitation performance. Calculated hydrodynamic parameters of waterjets and the estimates for achievable speed of fast boats have been confirmed by the sea trials.

**Conclusion.** Supercomputer optimization ensured successful beginning of the development of Russian waterjet family for fast boats not inferior to universally recognized market leaders in terms of performance parameters.

**Keywords:** numerical simulation, optimization, parametric model, waterjet propulsor.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

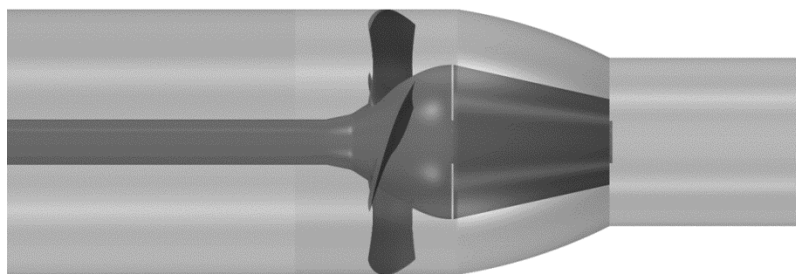
### Introduction

Процессы глобализации на рубеже XX–XXI вв. создали условия для широкого использования водометных движителей зарубежного производства на отечественных скоростных катерах. В настоящее время, в условиях политики импортозамещения зарубежных образцов техники и необходимости развития отечественного машиностроения, встала острая необходимость разработки типового ряда водометных движителей российского производства [1].

Типовой ряд водометных движителей для катеров представляет собой серию водометных движителей с фиксированным диаметром проточной части. Необходимость проектирования определенного набора рабочих колес и спрямляющих аппаратов обусловлена различной нагрузкой масс выпускаемых предприятиями катеров, различными требованиями по максимальной скорости их движения,

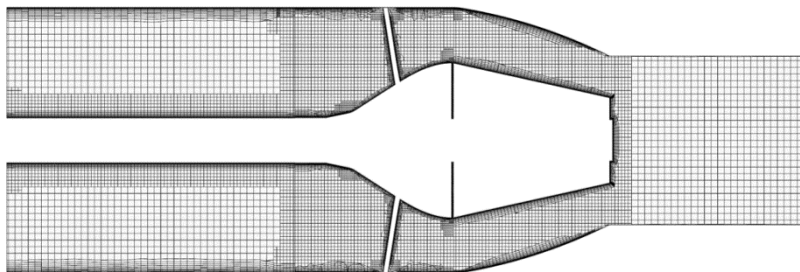
а также различной мощностью их двигателей [2, 3]. В зависимости от установленной энергетической установки изменяется не только располагаемый момент, передаваемый на рабочее колесо водометного движителя, но и частота вращения.

Обычно при проектировании образцов морской и речной техники проводятся пробные (поисковые) расчеты различных форм рабочего колеса водомета и других его частей, далее результат закрепляется поверочным расчетом. Когда требуется спроектировать водометный движитель типового ряда под конкретные режимы движения скоростного судна, форма проточной части, диаметр водовода и сопло остаются неизменными с целью унификации типового ряда водометов. Изменяемыми частями могут быть рабочее колесо и спрямляющий аппарат водометного движителя. В этом случае проектирование можно выполнить с помощью методов оптимизации с использованием математического моделирования и высокопроизводительных вычислений [4, 5].



**Рис. 1.** Общий вид рабочей области для оптимизационного поиска

**Fig. 1.** General view of the working domain for the optimization search



**Рис. 2.** Расчетная сетка для оптимизационного поиска. Сечение в диаметральной плоскости

**Fig. 2.** Calculation mesh for the optimization search (center-plane section)

## Постановка задачи

### Formulation of task

Перед проведением оптимизационных поисков в ходе виртуальных буксировочных испытаний скоростного судна на заданном режиме движения определяется средняя скорость протекания жидкости в рабочем канале водометного движителя. Значение этой скорости используется в качестве начального условия при решении задачи проектирования рабочего колеса методами суперкомпьютерной оптимизации.

Перед началом оптимизационного поиска необходимо определить количество лопастей рабочего колеса и максимальные геометрические размеры этих лопастей с учетом ограничений по габаритам ступицы и проточного канала водомета.

На следующем этапе исследований для оптимизационного поиска формы рабочего колеса используется упрощенная постановка, в которой происходит моделирование течения только в рабочей проточной части водометного движителя (рис. 1, 2). Это позволяет сократить потребные вычислительные ресурсы, сконцентрировавшись непосредственно на особенностях течения вблизи рабочего колеса.

Процесс оптимизации проходит под управлением российского программного комплекса pSeven [6] (рис. 3). Используется современный оптимизационный алгоритм на основе метамоделей (surrogate-based optimization), который характеризуется низкими требованиями к вычислительным ресурсам. Основная идея данного алгоритма заключается в замене полной расчетной модели на быстро вы-

числяемую суррогатную модель. В качестве вычислительного ядра используется программа Star-CCM+ (Siemens). Параметрическая модель рабочего колеса реализована в программном обеспечении (ПО) BladePlus, разработанном в Крыловском государственном научном центре [7].

В ходе оптимизации проверяется более сотни возможных вариантов с учетом заданных ограничений (момент на валу двигателя, предполагаемые объемы кавитационных каверн, минимально допустимый упор рабочего колеса). Возможные объемы кавитационных каверн оцениваются по методике, изложенной в работе [8]. Фактическое отсутствие/наличие кавитации во время ходовых испытаний катера определяется визуально, через прозрачную крышку технологического лючка в верхней части водовода.

В результате оптимизационного поиска получается один или несколько вариантов формы рабочего колеса под заданный режим, которые удовлетворяют необходимым ограничениям по располагаемому моменту и запасу кавитации и при этом обеспечивают необходимый упор водометного движителя (максимально возможный при заданных ограничениях).

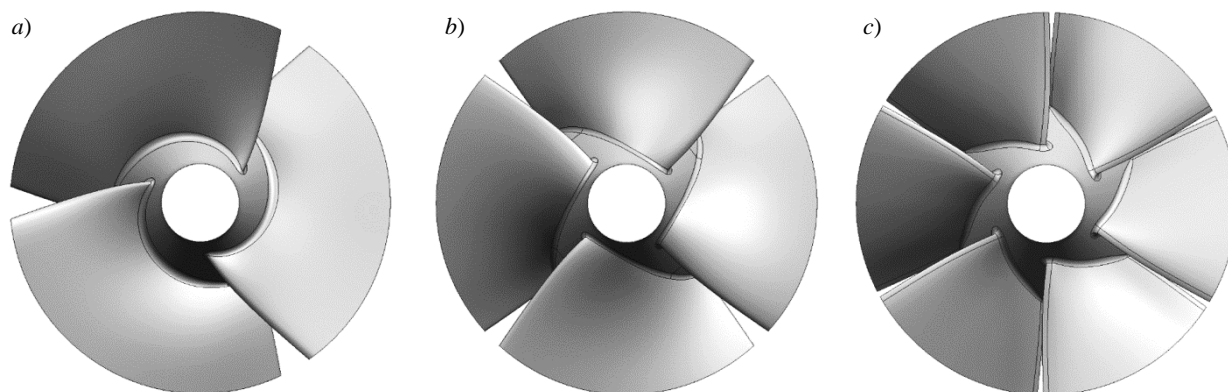
После проектирования рабочего колеса производится адаптация спрямляющего аппарата для работы совместно с оптимизированным вариантом рабочего колеса. Поиск формы спрямляющего аппарата происходит с учетом углов скоса потока за оптимизированным рабочим колесом водометного движителя.

После завершения оптимизационных поисков и корректировки спрямляющего аппарата выпол-

Рис. 3. Используемые программные средства

Fig. 3. Software used for the search





**Рис. 4.** Варианты рабочих колес: а) трехлопастной; б) четырехлопастной; в) шестилопастной  
**Fig. 4.** Impeller variants a) 3 blades; b) 4 blades; c) 6 blades

няется заключительный этап работы – определение достижимой скорости хода. В результате поворочных расчетов в прямой постановке с виртуальным диском (при замене рабочего колеса водометного движителя виртуальным диском с соответствующими гидродинамическими характеристиками) определяется скорость движения скоростного судна с водометным движителем, спроектированным под заданный режим. Замена полной модели водометного движителя на модель виртуального диска позволяет сократить потребные вычислительные ресурсы для моделирования процесса разгона катера и его выхода на движение с установившейся скоростью.

## Результаты оптимизации

### Optimization results

В ходе проектирования рабочих колес типового ряда водометных движителей методами оптимизации получают формы рабочих колес, которые дают тягу, необходимую для достижения требуемой скорости скоростного судна при фиксированной мощности двигателя. Полученное решение ха-

рактеризуется одновременно высоким КПД движителя и минимальными рисками возникновения кавитации на расчетном режиме.

В результате работы производителю водометных движителей передается трехмерная геометрическая модель водометного движителя, включающая в себя рабочее колесо и спрямляющий аппарат, спроектированные под заданный режим на основе суперкомпьютерной оптимизации.

На рис. 4 представлены формы рабочих колес водометных движителей, полученные в ходе оптимизационных исследований.

В таблице приводятся характеристики катеров и водометных движителей, а также требуемые по техническому заданию, прогнозируемые в расчетах и достигнутые на заводских ходовых испытаниях (ЗХИ) скорости хода катеров. Источниками погрешности могут быть как неопределенности в аэродинамическом сопротивлении катера (детальное моделирование надстройки и палубного оборудования в численном моделировании не производится), так и неполное соответствие условий ЗХИ и численного моделирования (погрешности в посадке судна и во внешних ветро-волновых условиях).

**Таблица.** Характеристики водометных движителей и катеров

**Table.** Parameters of impellers and fast boats

Водоизмещение катера, т	Частота вращения, об/мин.	Число лопастей	КПД импеллера	Требуемая по ТЗ скорость хода, км/ч	Расчетный прогноз скорости хода, км/ч	Результат ЗХИ, км/ч
~ 2,5	3500	3	0,64	70–75	83,5	82–83
~ 3	3000	6	0,61	70–75	69	72–73

## Заключение

### Conclusion

В настоящей статье описан процесс проектирования рабочих колес водометных движителей на основе использования методов суперкомпьютерной оптимизации.

Внедрение в проектные работы суперкомпьютерных технологий оптимизации, разрабатываемых в Крыловском центре, позволило начать создание типового ряда водометных движителей для установки их вместо импортных водометов на скоростные катера.

Натурные испытания спроектированных водометов показали достижение при проектной осадке требуемой скорости и отсутствие кавитации в канале и на лопастях рабочего колеса на рабочих режимах.

## Список использованной литературы

1. *Маринич Н.В.* [и др.]. Разработка типового ряда водометных движителей судов повышенной мореходности // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Вып. 4(394). С. 13–20.
2. *Папир А.Н.* Водометные движители малых судов. Ленинград : Судостроение, 1970. 254 с.
3. *Анчиков С.Л.* Водометные движители. Вопросы проектирования. Санкт-Петербург : Реноме, 2021. 251, [1] с.
4. Опыт использования программного комплекса Star-CD для расчета характеристик течения вязкой жидкости в канале водометного движителя / *Д.М. Денисихина, М.П. Лобачев, Н.А. Овчинников, А.Е. Таранов* // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2007. Вып. 31(315). С. 28–41.
5. Многокритериальная оптимизация модели гребного винта с учетом влияния корпуса судна / *М.П. Лобачев, В.Н. Новоселов, Т.И. Сайфуллин, А.Е. Таранов* // Суперкомпьютерные дни в России: труды международной конференции. Москва, 21–22 сентября 2020 г. / Под. ред. *В.В. Воеводина*. Москва : МАКС Пресс, 2020. 172 с. С. 60–73. DOI: 10.29003/m1406.RussianSCDays-2020.
6. pSeven: прогн. комплекс для анализа данных и оптимизации // ДАТАДВАНС: [официальный сайт]. Москва, 2021. URL: <https://www.datadvance.net/ru/product/pseven> (дата обращения: 13.09.2021).
7. Свидетельство № 2019663281 Российская Федерация. Программа для ЭВМ «Blade Plus» : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / *Н.В. Новоселов*; заявитель и правообладатель ФГУП «Крыловский государственный научный

центр». № 2019662332; заявл. 07.10.2019; зарегистр. 15.10.2019. 1 с.

8. *Лобачев М.П., Рудниченко А.А.* Расчетное определение начала кавитации рабочего колеса водометного движителя насосного типа // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 3(389). С. 63–72.

## References

1. *N.V. Marinich, V.A. Rodionov, A.A. Koval, A.V. Sverchkov, F.E. Mamontov.* Development of a standard range of waterjets for vessels with high seakeeping performance // Transactions of Krylov State Research Centre, 2020, Issue 4(394), pp. 13–20, DOI: 10.24937/2542-2324-2020-4-394-13-20 (in Russian).
2. *A. Papir.* Waterjet propulsion of small craft. Leningrad, Sudostroyeniye, 1970, 254 pp. (in Russian).
3. *S. Anchikov.* Waterjet propulsion. Design challenges. St. Petersburg, Renome, 2021, 251 [1] pp. (in Russian).
4. *D. Denisikhina, M. Lobachev, N. Ovchinnikov, A. Taranov.* Experience of viscous flow calculations in waterjet duct in Star-CD software package // Transactions of Krylov State Research Centre, 2007, Issue 31(315), pp. 28–41 (in Russian).
5. *M. Lobachev, V. Novoselov, T. Saifullin, A. Taranov.* Multi-criterial optimization of propeller model with consideration of hull effect // Russian Supercomputer Days: Proceedings of International Conference. Moscow, MAKS Press, 2020, pp. 60–73 (in Russian), DOI: 10.29003/m1406.RussianSCDays-2020.
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. 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).
8. *M. Lobachev, A. Rudnichenko.* Cavitation inception calculation for pumpjet impeller // Transactions of Krylov State Research Centre, 2019, Issue 3(389), pp. 63–72 (in Russian).

---

## 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](mailto:krylov@krylov.spb.ru). <https://orcid.org/0000-0001-5669-9058>.  
*Рудниченко Алексей Андреевич*, инженер 1-й 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.

*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: AE\_Taranov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1325-3838>.

### About the authors

*Mikhail P. Lobachev*, Cand. Sci. (Eng), Head of Division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Mos-

kovskoye 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>.

*Alexey A. Rudnichenko*, Engineer 1<sup>st</sup> 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>.

*Timur I. Saifullin*, 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.

*Andrey Ye. Taranov*, 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: 31.08.21  
Принята в печать / Accepted: 09.03.22  
© Коллектив авторов, 2022