

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-627485>

Оригинальное исследование



# Стохастический метод поиска оптимальной формы проточной части погружного электронасоса

Д.А. Горбатов<sup>1, 2</sup>, А.А. Жарковский<sup>1</sup>, А.В. Адрианов<sup>2</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;<sup>2</sup> СУЛАК, Санкт-Петербург, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** При проектировании насосов с целью получения высокого уровня коэффициента полезного действия применяют современные подходы, основанные на методах численной оптимизации. Эти методы с использованием параметрических моделей проточных частей насосов позволяют отыскать глобальный или локальный экстремум целевой функции и получить оптимальную геометрическую форму проточной части. Объектом данного исследования является водоотливной погружной электронасос с консольным расположением рабочего колеса, применяемый в судостроительной отрасли.

**Цель исследования.** Расчётным путём улучшить энергетические показатели проточной части погружного электронасоса высокой быстроходности на номинальном режиме его работы с использованием стохастического алгоритма поиска глобального экстремума целевой функции — гидравлического коэффициента полезного действия насоса.

**Материалы и методы.** Поиск оптимальной формы проточной части осуществлялся с применением математического моделирования трёхмерного течения вязкой жидкости в расчётной области исследуемого объекта. Параметрическая модель проточной части включает девять варьируемых геометрических параметров — четыре в рабочем колесе и пять в отводящем элементе, и диапазон их изменения. В качестве алгоритма поиска глобального экстремума целевой функции используется метод латинского гиперкуба, который обеспечивает равномерное распределение варьируемых геометрических параметров в пространстве поиска. По составленной матрице расчётных точек с различными комбинациями параметров выполнены прямые гидродинамические расчёты течения в проточной части насоса.

**Результаты.** Результаты расчётов показали, что гидравлический коэффициент полезного действия насоса удалось увеличить на 7% относительно исходной проточной части. Из анализа полей скоростей в расчётной области следует, что улучшение энергетических показателей во многом достигнуто за счёт увеличения ширины каналов между электродвигателем и корпусом, что привело к уменьшению скоростей и снижению уровня гидравлических потерь в отводящем элементе проточной части насоса.

**Выводы.** Метод латинского гиперкуба показал свою эффективность при нахождении глобального экстремума гидравлического коэффициента полезного действия насоса, результат которого в дальнейшем может быть использован как начальное приближение при поиске локального экстремума прямыми методами в окрестностях найденного глобального максимума целевой функции.

**Ключевые слова:** погружной электронасос; математическая модель; численная оптимизация; метод латинского гиперкуба; глобальный экстремум; целевая функция; модель турбулентности.

## Как цитировать:

Горбатов Д.А., Жарковский А.А., Адрианов А.В. Стохастический метод поиска оптимальной формы проточной части погружного электронасоса // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 2. С. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-627485>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-627485>

Original Study Article

# Searching stochastic method of the submersible electric pump flow part optimal shape

Daniil A. Gorbatov<sup>1, 2</sup>, Alexander A. Zharkovskii<sup>1</sup>, Artemy V. Adrianov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> SULAK, Saint Petersburg, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Modern approaches based on numerical optimization methods are used in development of pumps in order to achieve the high level of efficiency. These methods with use of parametrical models of flow sections of pumps help to find either global or local extremum of an objective function and to obtain the optimal geometric shape of the flow section. The study object is a dewatering electric submersible pump with cantilever working wheel arrangement used in shipbuilding industry.

**AIM:** Improvement of energy indicators of the flow section of the high-speed electric submersible pump at the nominal operation mode by means of calculation with the use of the stochastic algorithm of search of the global extremum of an objective function that is pump hydraulic efficiency.

**METHODS:** Search of the optimal shape of the flow section was conducted with the use of mathematical modelling of three-dimensional flow of a viscous fluid in the computational region of the studied object. The parametrical model of the flow section includes nine geometric variables (four variables for a working wheel, five variables for an outlet element) and their variation ranges. The chosen algorithm of search of the global extremum of the objective function is the Latin hypercube method which ensure uniform distribution of geometric variables in the search space. According to the compiled matrix of experiments with various combinations of parameters, direct fluid dynamics simulations of flow in the flow section were performed.

**RESULTS:** Simulation results showed that it was managed to improve the pump hydraulic efficiency by 7% in comparison with the initial flow section. According to the velocity field analysis, energy indicators improvement was achieved mainly by increasing the width of channels between an electric motor and a housing, leading to velocities decreasing and lowering the level of hydraulic losses in the outlet element of the flow section of the pump.

**CONCLUSIONS:** The Latin hypercube method proved its effectiveness in search of the global extremum of the pump hydraulic efficiency. The obtained result can be used in further as the initial point in search of the local extremum with direct methods in the area around the found global extremum of the objective function.

**Keywords:** electric submersible pump; mathematical model; numerical optimization; the Latin hypercube method; global extremum; objective function; turbulence model.

## To cite this article:

Gorbatov DA, Zharkovskii AA, Adrianov AV. Searching stochastic method of the submersible electric pump flow part optimal shape. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;18(2):103–110. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-627485>

Received: 26.02.2024

Accepted: 22.06.2024

Published online: 30.06.2024

## ВВЕДЕНИЕ

Современные методы расчёта и проектирования проточных частей динамических насосов с высокими показателями энергоэффективности в основном базируются на решении задачи трёхмерного расчёта течения вязкой жидкости в расчётной области исследуемого объекта [1]. При этом высокий уровень КПД насосного агрегата во многом определяется формой лопастных систем рабочего колеса и направляющего аппарата и может быть достигнут с помощью решения задачи численной оптимизации проточной части гидромашины [2].

С целью поиска оптимального соотношения геометрических параметров проточной части используют различные оптимизационные подходы. В работе [3] методом ЛП-тау поиска проведена комплексная оптимизация, в результате которой удалось улучшить гидравлические показатели проточной части герметичного насоса. Наилучшим подходом при численной оптимизации осевого насоса оказалось последовательное применение стохастического и градиентного методов оптимизации, при котором в первом приближении стохастическим алгоритмом выполняется поиск глобального экстремума, а затем с помощью направленного метода ищется локальный экстремум функции [4]. Для сокращения вычислительных и временных ресурсов в настоящее время используют метамоделли, которые разрабатывают на основе результатов прямых расчётов по составленной матрице эксперимента [5]. Аппроксимационные функции (метамоделли), при качественном их построении, способны с высокой точностью предсказать экстремумы целевых функций [6].

**Цель работы** заключается в повышении гидравлического КПД насоса с использованием стохастического метода поиска оптимальной формы проточной части — метода латинского гиперкуба. Этот подход позволяет найти глобальный экстремум целевой функции.

**Объектом исследования** является водоотливной погружной электронасос вертикального исполнения

с коэффициентом быстроходности  $ns=205$ . На рис. 1 представлена цифровая модель насоса, содержащая: входной патрубок — 1, рабочее колесо — 2, направляющий аппарат — 3, кольцевую область между корпусом электродвигателя и корпусом насоса — 4, напорный патрубок — 5.

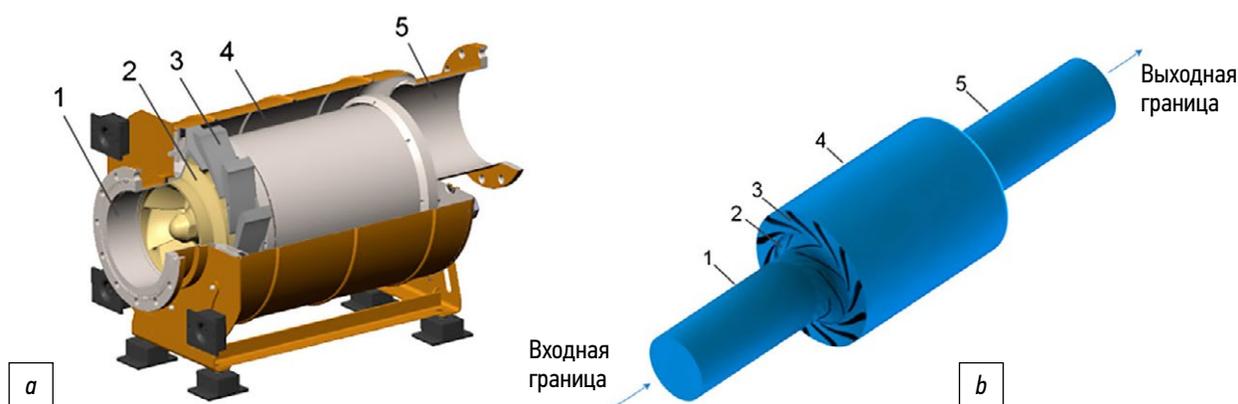
## МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТОВ

Методика численных расчётов основана на решении прямой гидродинамической задачи трёхмерного течения вязкой жидкости в исследуемой расчётной области. Моделирование потока в проточной части выполнялось методом конечных объёмов с использованием CFD-пакета ANSYS CFX.

В целях апробации методики расчётов вычислена математическая модель исходного варианта проточной части исследуемого объекта. Полноразмерная, без условия периодичности, расчётная область включает в себя все элементы проточной части, отмеченные на рис. 1. Расчётная сетка — тетраэдральная, общее количество ячеек составило 11 млн. Граничные условия: на входе — полное давление, на выходе — массовый расход. Модель турбулентности —  $k$ -epsilon [7]. Граница стенок — без проскальзывания, стенки определены с учётом эквивалентной шероховатости [8]. Параметры течения между вращающимся и стационарным доменами осредняются по окружности, тип интерфейса — Stage. Расчёты проводились в стационарной постановке.

## ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ

В работе улучшение энергетических показателей объекта исследования направлено на поиск глобального максимума целевой функции — гидравлического КПД насоса — на номинальном режиме его работы. В связи с этим выбран стохастический метод поиска оптимальной формы проточной части в заданных границах.



**Рис. 1.** Цифровая модель (а) и расчётная область (б) погружного электронасоса.

**Fig. 1.** The digital model (a) and the computational region (b) of the submersible pump.

При проведении оптимизационных расчётов в целях экономии вычислительных и временных ресурсов используется упрощённая геометрия расчётной области с условием периодичности.

Меридианная проекция параметрической модели расчётной области описана входной границей подводящего патрубка, выходной границей напорного патрубка, втулочными и периферийными обводами проточной части, входными и выходными кромками лопастей рабочего колеса и лопатками направляющего аппарата.

Лопастная система рабочего колеса построена по трём линиям тока — втулке, периферии и средней линии. Законы изменения углов и толщин лопасти заданы сплайном по трём опорным точкам — на входной и выходной кромках, а также в средней части, которая формирует значение угла охвата лопасти.

Цилиндрическая лопатка направляющего аппарата описана по двум линиям тока — втулке и периферии. Закон изменения углов лопатки — линейный, заданный по двум опорным точкам — на входной и выходной кромках. Так как аппарат устанавливается на двигатель с помощью шпилек, проходящих через лопатку, то закон изменения толщин определён с учётом конструктивных ограничений.

Параметрическая модель расчётной области включает 9 варьируемых геометрических параметров: втулочные и периферийные углы лопасти рабочего колеса на входе и в средней части линии тока —  $\beta_{л1вт}$ ,  $\beta_{л1пер}$ ,  $\beta_{л1-2вт}$ ,  $\beta_{л1-2пер}$ ; входной и выходной углы лопатки направляющего аппарата —  $\beta_{л3}$ ,  $\beta_{л4}$ ; ширина канала направляющего аппарата —  $b_3$ ; ширина канала кольцевой области —  $b$ , ширина канала между электродвигателем и напорным патрубком —  $B$ .

Предварительные численные расчёты исследуемого объекта показали, что основной уровень гидравлических потерь сосредоточен в отводящем элементе. По этой причине варьируемые параметры в данном элементе проточной части определены в широком диапазоне изменения значений.

Значения варьируемых геометрических параметров расчётной области отмечены в табл. 1, а их графическое отображение представлено на рис. 2.

В выбранном методе поиска — метод латинского гиперкуба (LHS метод) — расчётные точки случайным образом распределяются по ортогональной сетке пространства параметров так, чтобы любые две точки не имеют одинаковых значений какого-либо параметра.

Стохастический метод LHS обеспечивает равномерное распределение геометрических параметров в пространстве поиска.

Распределение параметров ширины канала кольцевой области и ширины канала за кольцевой областью  $b / D_2$  и  $B / D_2$  в области поиска проиллюстрировано на рис. 3.

В выбранном диапазоне изменения значений входных параметров создана таблица, состоящая из 1000 расчётных точек с различными комбинациями варьируемых геометрических параметров. На основании таблицы выполнены прямые гидродинамические расчёты с целевой функцией — максимизация значения гидравлического КПД насоса.

По результатам проведения оптимизационных расчётов определён наилучший вариант формы проточной части. Затем были выполнены численные расчёты данного оптимального варианта, математическая модель которого соответствует апробированной математической модели исходного варианта проточной части.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

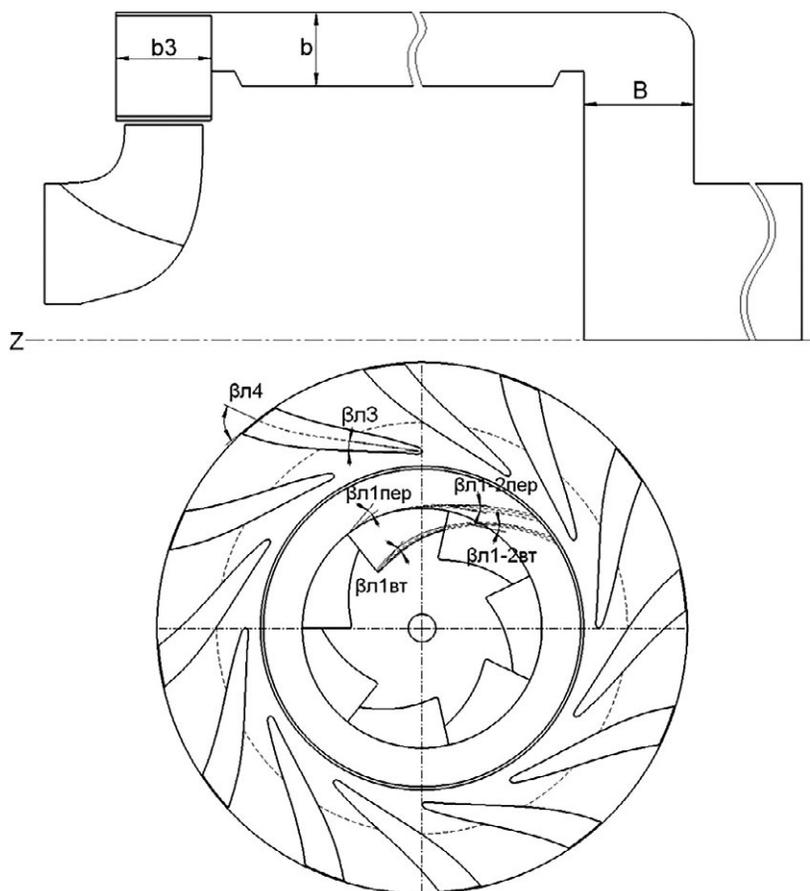
Значения входных геометрических параметров и целевой функции исходного и оптимального вариантов проточных частей представлены в табл. 2, а визуализация структуры течения проиллюстрирована на рис. 4.

Из приведённых данных в табл. 2 следует, что оптимальная проточная часть имеет увеличенное значение ширины канала в кольцевой области ( $b / D_2 = 0,262$ ) и ширины канала между электродвигателем и напорным

**Таблица 1.** Значения варьируемых геометрических параметров

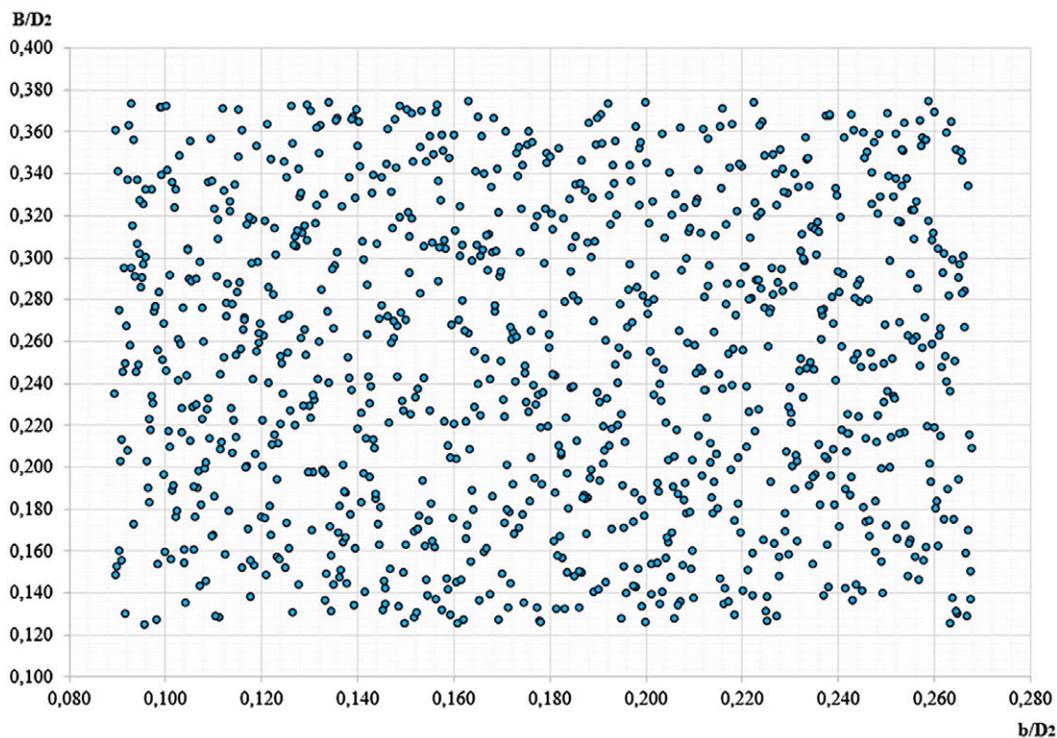
**Table 1.** Values of geometric variables

№	Пар-р	Наименование	Min	Max
1	$\beta_{л1вт}$	Угол установки лопасти РК на втулке на входе	16°	20°
2	$\beta_{л1пер}$	Угол установки лопасти РК на периферии на входе	15°	19°
3	$\beta_{л1-2вт}$	Угол установки лопасти РК на втулке в средней части	25°	33°
4	$\beta_{л1-2пер}$	Угол установки лопасти РК на периферии в средней части	23°	31°
5	$\beta_{л3}$	Угол установки лопатки НА на входе	11°	15°
6	$\beta_{л4}$	Угол установки лопатки НА на выходе	30°	90°
7	$b_3 / D_2$	Ширина канала НА	0,179	0,214
8	$b / D_2$	Ширина канала кольцевой области	0,089	0,268
9	$B / D_2$	Ширина канала на повороте за кольцевой областью	0,125	0,375



**Рис. 2.** Варьируемые геометрические параметры расчётной области.

**Fig. 2.** Geometric variables of the computational region.

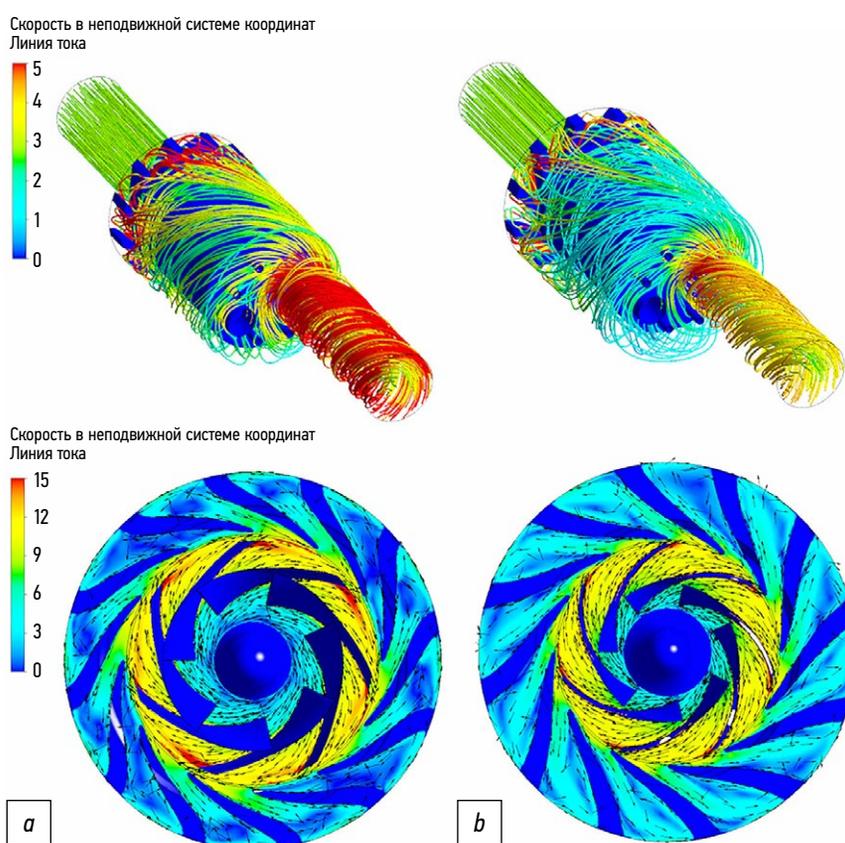


**Рис. 3.** Распределение варьируемых параметров  $b / D_2$  и  $B / D_2$  в области поиска.

**Fig. 3.** Distribution of the  $b / D_2$  and  $B / D_2$  variables in the search space.

**Таблица 2.** Значения входных параметров и целевой функции проточных частей**Table 2.** Values of initial parameters and the objective function of the flow section

№	Параметр	Исходная проточная часть	Оптимальная проточная часть
1	$\beta_{л1вт}$	15,7°	19,4°
2	$\beta_{л1пер}$	14,9°	15,2°
3	$\beta_{л1-2вт}$	28,5°	31,8°
4	$\beta_{л1-2пер}$	20,1°	26,9°
5	$\beta_{л3}$	15,2°	13,3°
6	$\beta_{л4}$	90,0°	67,9°
7	$b_3 / D_2$	0,230	0,181
8	$b / D_2$	0,177	0,262
9	$B / D_2$	0,266	0,302
10	КПДг	68,6%	75,6%

**Рис. 4.** Поля скоростей в исходной (а) и оптимальной (b) проточных частях.**Fig. 4.** Velocity fields in the initial (a) and the optimal (b) flow sections.

патрубком ( $B / D_2 = 0,302$ ), что привело к уменьшению скоростей и снижению уровня гидравлических потерь в отводящем устройстве, как показано на рис. 4.

## ВЫВОДЫ

1. Стохастический LHS метод распределения входных параметров в поле поиска показал свою эффективность при нахождении глобального максимума

гидравлического КПД насоса, результат которого может быть использован как начальное приближение при поиске локального максимума в окрестностях найденного глобального экстремума целевой функции исследуемого объекта.

2. С помощью метода латинского гиперкуба удалось увеличить значение гидравлического КПД насоса относительно исходной проточной части объекта исследования на 7%.

3. Анализ результатов оптимизационных расчётов показал, что увеличение целевой функции — гидравлического КПД насоса — во многом достигнуто за счёт большей ширины каналов между корпусом электродвигателя и корпусом насоса, что привело к снижению скоростей и уровня гидравлических потерь в статорных элементах проточной части исследуемого насоса.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Д.А. Горбатов — обзор литературы по теме статьи, проведение расчётных исследований, написание текста рукописи; А.А. Жарковский — научное руководство, редактирование текста рукописи, утверждение финальной версии; А.В. Адрианов — экспертная оценка, согласование финальной версии. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE*. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбатов Д.А., Жарковский А.А., Адрианов А.В. Влияние различных вариантов направляющего аппарата на гидравлические потери в элементах проточной части погружного электронасоса. В кн.: Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Материалы XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию кафедры «Гидромеханики и гидравлических машин им. В.С. Квятковского» Национального исследовательского университета «МЭИ». Москва: МЭИ, 2021. С. 60–65. EDN: PYVRDU
2. Галдин Д.Н., Кретинин А.В., Печкуров С.В. Оптимизация профиля пространственного рабочего колеса центробежного насоса с использованием параметризованной модели проточной части и искусственной нейронной сети // Насосы. Турбины. Системы. 2021. № 3 (40). С. 22–31. EDN: EVAYEI
3. Чабурко П.С., Ломакин В.О., Кулешова М.С., Баулин М.Н. Комплексная оптимизация проточной части герметичного насоса методом ЛП-тау поиска // Насосы. Турбины. Системы. 2016. № 1 (18). С. 55–61. EDN: WDEQVX

## REFERENCES

1. Gorbatov DA, Zharkovsky AA, Adrianov AV. Consideration of various options for guiding influence on hydraulic losses in the elements of the flow part of a submersible electric pump. In: *Hydraulic, hydraulic drives and hydropneumatic automation. Materials of the XXV International Scientific and Technical Conference dedicated to the 75th anniversary of the Department of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines named after V.S. Kvyatkovsky* Research University "MPEI". Moscow: MEI; 2021:60–65. (In Russ). EDN: PYVRDU

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** D.A. Gorbatov — literature review on the topic of the article, conducting computational research, writing the manuscript text; A.A. Zharkovskii — scientific supervision, editing of the manuscript text, approval of the final version; A.V. Adrianov — expert evaluation, agreement of the final version. Authors confirm the compliance of their authorship with the ICMJE international criteria. All authors contributed substantially to the conceptualization, research and preparation of the article, and read and approved the final version before publication.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

4. Свобода Д.Г., Иванов Е.А., Жарковский А.А., Щуцкий С.Ю. Оптимизация проточной части осевого насоса с использованием прямых методов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 12 (753). С. 116–123. EDN: LGLYSX. doi: 10.18698/0536-1044-2022-12-116-123
5. Свобода Д.Г., Иванов Е.А., Жарковский А.А., Щуцкий С.Ю. Оптимизация проточной части осевого насоса с использованием поверхности отклика // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 8 (749). С. 74–83. EDN: IUJUA. doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-74-83
6. Валюхов С.Г., Галдин Д.Н., Коротов В.В., Русин В.А. Использование аппроксимационных моделей для выполнения оптимизации профиля рабочего колеса центробежного насоса // Насосы. Турбины. Системы. 2020. № 2 (35). С. 58–65. EDN: RRUDUX
7. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Травин А.К., Шур М.Л. Современные подходы к моделированию турбулентности. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016.
8. Gulich J.F. Centrifugal Pumps. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-12824-0

2. Galdin DN, Kretinin AV, Pechkurov SV. Optimization of the profile of a spatial impeller of a centrifugal pump using a parameterized model of the flow path and an artificial neural network. *Nasosy. Turbiny. Sistemy*. 2021;3(40):22–31. (In Russ). EDN: EVAYEI
3. Chaburko PS, Lomakin VO, Kuleshova MS, Baulin MN. Comprehensive optimization of the flow part of a sealed pump using the LP-tau search method. *Nasosy. Turbiny. Sistemy*. 2016;1(18):55–61. (In Russ). EDN: WDEQVX

4. Svoboda DG, Ivanov EA, Zharkovsky AA, Shchutsky SYu. Optimization of the flow path of an axial pump using direct methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*. 2022;12(753):116–123. (In Russ). EDN: LGLYSX. doi: 10.18698/0536-1044-2022-12-116-123
5. Svoboda D.G., Ivanov E.A., Zharkovsky A.A., Shchutsky S.Yu. Optimization of the flow path of an axial pump using a response surface. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*. 2022;8(749):74–83. (In Russ). EDN: IUJUA. doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-74-83

6. Valyukhov SG, Galdin DN, Korotov VV, Rusin VA. Using approximation models to optimize the profile of a centrifugal pump impeller. *Nasosy. Turbiny. Sistemy*. 2020;2(35):58–65. (In Russ). EDN: RRUDUX
7. Garbaruk AV, Strelets MKh, Travin AK, Shur ML. *Modern approaches to turbulence modeling*. Sankt Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2016. (In Russ).
8. Gulich JF. *Centrifugal Pumps*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-12824-0

## ОБ АВТОРАХ

### \* Горбатов Даниил Анатольевич,

аспирант Высшей школы энергетического машиностроения  
Института энергетики;  
ведущий конструктор Основного подразделения ООО «СУЛАК»;  
адрес: Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, д. 29  
ORCID: 0000-0002-3172-3346;  
eLibrary SPIN: 5727-2661;  
e-mail: Da.Gorbatov@yandex.ru

### Жарковский Александр Аркадьевич,

д-р техн. наук,  
профессор Высшей школы энергетического машиностроения  
Института энергетики;  
ORCID: 0000-0002-3044-8768;  
eLibrary SPIN: 3637-7853;  
e-mail: azharkovsky@gmail.com

### Адрианов Артемий Владимирович,

генеральный директор;  
ORCID: 0000-0003-4853-0804;  
eLibrary SPIN: 8117-4795;  
e-mail: mr\_a@inbox.ru

## AUTHOR'S INFO

### \* Daniil A. Gorbatov,

Postgraduate of the Higher School of Power Engineering  
of the Institute of Energy;  
Leading Designer of the Main Division of SULAK LLC;  
address: 29 Polytekhnikeskaya street, 195251 Saint Petersburg,  
Russian Federation;  
ORCID: 0000-0002-3172-3346;  
eLibrary SPIN: 5727-2661;  
e-mail: Da.Gorbatov@yandex.ru

### Alexander A. Zharkovskii,

Dr. Sci. (Engineering),  
Professor of the Higher School of Power Engineering  
of the Institute of Energy;  
ORCID: 0000-0002-3044-8768;  
eLibrary SPIN: 3637-7853;  
e-mail: azharkovsky@gmail.com

### Artemiy V. Adrianov,

CEO;  
ORCID: 0000-0003-4853-0804;  
eLibrary SPIN: 8117-4795;  
e-mail: mr\_a@inbox.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author