

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^{1, 2}, Alexander A. Zharkovskii¹, Artemy V. Adrianov²¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation;² 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 if 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

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

Оригинальное исследование

Стохастический метод поиска оптимальной формы проточной части погружного электронасоса

Д.А. Горбатов^{1, 2}, А.А. Жарковский¹, А.В. Адрианов²¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;² 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>

INTRODUCTION

Modern methods for calculating and designing dynamic pump flow parts with high energy efficiency indicators involve solving the problem of three-dimensional flow analysis of a viscous liquid in the computational domain of the object under study [1]. The efficiency of the pumping unit is largely determined by the shape of its impeller and guide vanes. Achieving optimal efficiency requires numerical optimization of the flow part of the hydraulic machine [2].

Various optimization approaches are used to identify the best geometric parameters for the flow parts. A comprehensive optimization approach [3] utilized the LP-tau method to enhance the hydraulic performance of the flow part of the sealed pump. The best approach for optimizing an axial pump was a combination of stochastic and gradient optimization methods. In the first approximation, a stochastic algorithm seeks the global extremum, followed by using a directional method to identify a local extremum [4]. Metamodels are increasingly used to minimize computational costs and time. These are developed based on direct calculation results from a compiled experiment matrix [5]. Well-developed approximation functions (metamodels) can accurately predict the extrema of target functions [6].

The aim of the work is to improve the hydraulic efficiency of pumps using a stochastic method, specifically the Latin hypercube sampling approach, to find the optimal shape of the flow part. This approach allows us to identify the global extremum of the target function.

The object of the study is a vertical submersible drainage electric pump with a speed coefficient $ns = 205$. Figure 1 shows a digital model of the pump that contains an inlet pipe — 1, an impeller — 2, guide vanes — 3, the annular area between the motor and pump housings — 4, and a discharge pipe — 5.

METHOD OF NUMERICAL CALCULATIONS

The numerical calculation method is based on solving the direct hydrodynamic problem of three-dimensional viscous liquid flow in the studied computational domain. Flow modeling in the flow section was performed using the finite volume method with the ANSYS CFX CFD package.

To validate the calculation method, a mathematical model of the initial flow part version of the object under study was calculated. The computational domain in its full scale and without periodicity conditions includes all elements of the flow section as shown in Fig. 1. The mesh is tetrahedral with 11 million cells. The boundary conditions applied include full pressure at the suction point and mass flow at the discharge. A k-epsilon turbulence model was used [7]. The walls are set as no-slip boundaries, considering equivalent roughness [8]. The flow parameters between the rotating and stationary domains are averaged around a circle, with Stage as the interface type. The calculations were carried out under stationary conditions.

SEEKING FOR THE OPTIMAL SHAPE OF THE FLOW PART

In this work, the goal is to improve the energy indicators of the research object by identifying the global maximum of the target function, specifically the hydraulic efficiency of the pump in its nominal operating mode. In this regard, a stochastic method is used to find the optimal shape of the flow part within specified boundaries.

To conserve computational and time resources during optimization calculations, a simplified geometry of the computational domain with periodicity conditions is used.

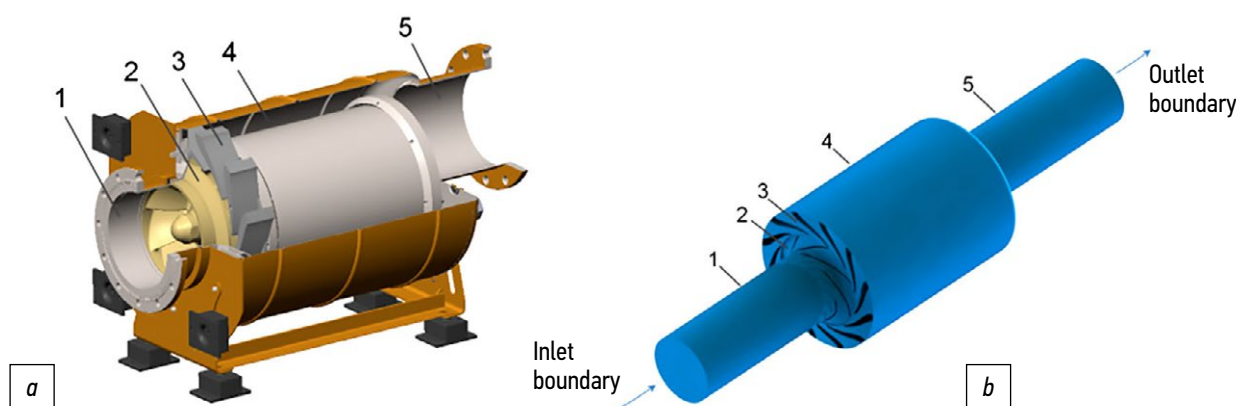


Fig. 1. The digital model (a) and the computational region (b) of the submersible pump.

Рис. 1. Цифровая модель (a) и расчётная область (b) погружного электронасоса.

In this work, the goal is to improve the energy indicators of the research object by identifying the global maximum of the target function, specifically the hydraulic efficiency of the pump in its nominal operating mode. In this regard, a stochastic method is used to find the optimal shape of the flow part within specified boundaries.

To conserve computational and time resources during optimization calculations, a simplified geometry of the computational domain with periodicity conditions is used.

The meridian projection of the parametric model of the computational domain is described by the inlet boundary of the suction pipe, the outlet boundary of the discharge pipe, the sleeve, and peripheral contours of the flow part, as well as the inlet and outlet edges of the impeller blades and guide vanes.

The impeller blade system is built along three flow lines: the sleeve, the periphery, and the middle line. The changes in blade angles and thicknesses are defined by a spline along three reference points: at the input and output edges, as well as in the middle part, which determines the coverage angle of the blade.

The cylindrical blade of the guide vanes is described by two flow lines: the sleeve and the periphery. The blade angle changes are linear, defined by two reference points at the input and output edges. Since the vanes are installed on the engine using studs passing through the blade, the thickness change is determined by design limitations.

The parametric model of the computational domain includes nine variable geometric parameters, namely sleeve and peripheral angles of the impeller blade at the inlet and middle parts of the current line (β_{i1sl} , β_{i1per} , β_{i1-2sl} , $\beta_{i1-2per}$), input and output angles of the guide vane blade (β_{i3} , β_{i4}), channel width of the guide vanes (b_3), channel width of the annular area (b), and channel width between the electric motor and discharge pipe (B).

Preliminary numerical calculations of the object under study indicate that the main hydraulic losses are concentrated in the discharge element. Therefore,

the variable parameters in this flow section were determined across a wide range of values.

The values of these geometric parameters are listed in Table 1, with their graphical representation shown in Fig. 2.

In the chosen search method, the Latin hypercube sampling method (LHS method) calculated points are randomly distributed across an orthogonal mesh of the parameter space, ensuring two points share the same parameter values.

This stochastic LHS method provides an uniform distribution of geometric parameters within the search space.

Fig. 3 illustrates how channel width parameters of the annular area beyond (b/D_2 and B/D_2) are distributed in the search area.

A table consisting of 1000 calculated points, each with different combinations of variable geometric parameters, has been created in the selected range of input parameter values. This table served as the basis for direct hydrodynamic calculations performed with the target function aimed at maximizing the hydraulic efficiency value of the pump.

The optimization calculations identified the most effective shape for the flow part. Subsequently, numerical calculations were conducted on this optimal design, using a mathematical model corresponding to that of the initial version tested earlier.

RESULTS

Table 2 presents the input geometric parameters and the target function for both the initial and optimal versions of the flow parts, Fig. 4 providing a visualization of the flow structure.

The data in Table 2 reveal that the optimal flow part features increased channel width in the annular region ($b/D_2 = 0.262$) and between the electric motor and

Table 1. Values of geometric variables

Таблица 1. Значения варьируемых геометрических параметров

Nº	Parameter	Name	Min	Max
1	β_{i1sl}	Installation angle of the impeller blade on the sleeve at the suction	16°	20°
2	β_{i1per}	Installation angle of the impeller blade on the periphery at the suction	15°	19°
3	β_{i-2sl}	Installation angle of the impeller blade on the sleeve in the middle part	25°	33°
4	$\beta_{i1-2per}$	Installation angle of the impeller blade on the periphery in the middle part	23°	31°
5	β_{i3}	Installation angle of the guide vanes at the inlet	11°	15°
6	β_{i4}	Installation angle of the guide vanes at the outlet	30°	90°
7	b_3 / D_2	Channel width of guide vanes channel width	0,179	0,214
8	b / D_2	Width of the annular area channel	0,089	0,268
9	B / D_2	Channel width at the turn beyond the annular area	0,125	0,375

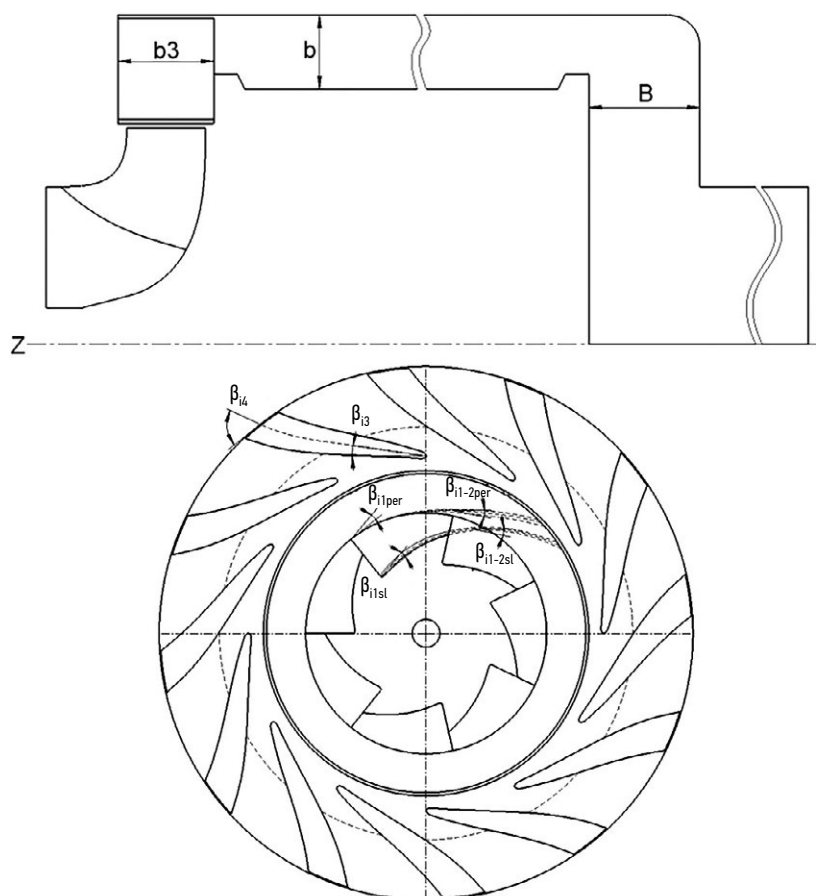


Fig. 2. Geometric variables of the computational region.

Рис. 2. Варьируемые геометрические параметры расчётной области.

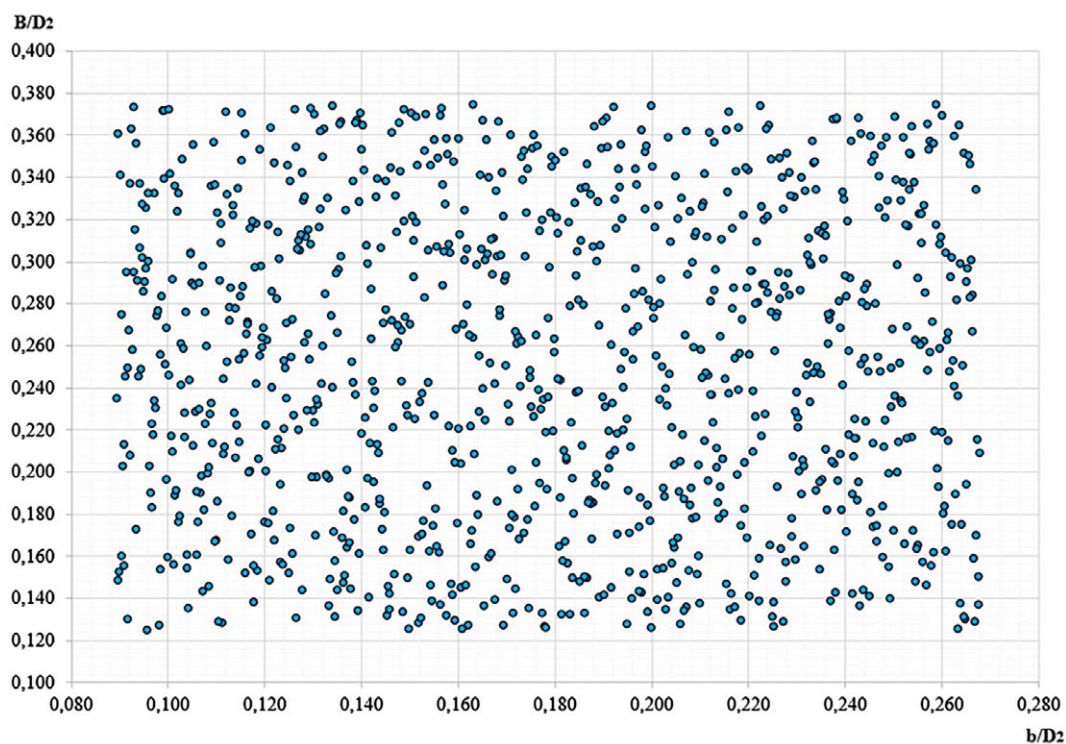


Fig. 3. Distribution of the b / D_2 and B / D_2 variables in the search space.

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

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

№	Parameter	Initial flow part	Optimal flow part
1	β_{i1sl}	15,7°	19,4°
2	β_{i1per}	14,9°	15,2°
3	β_{i1-2sl}	28,5°	31,8°
4	$\beta_{i1-2per}$	20,1°	26,9°
5	β_{i3}	15,2°	13,3°
6	β_{i4}	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%

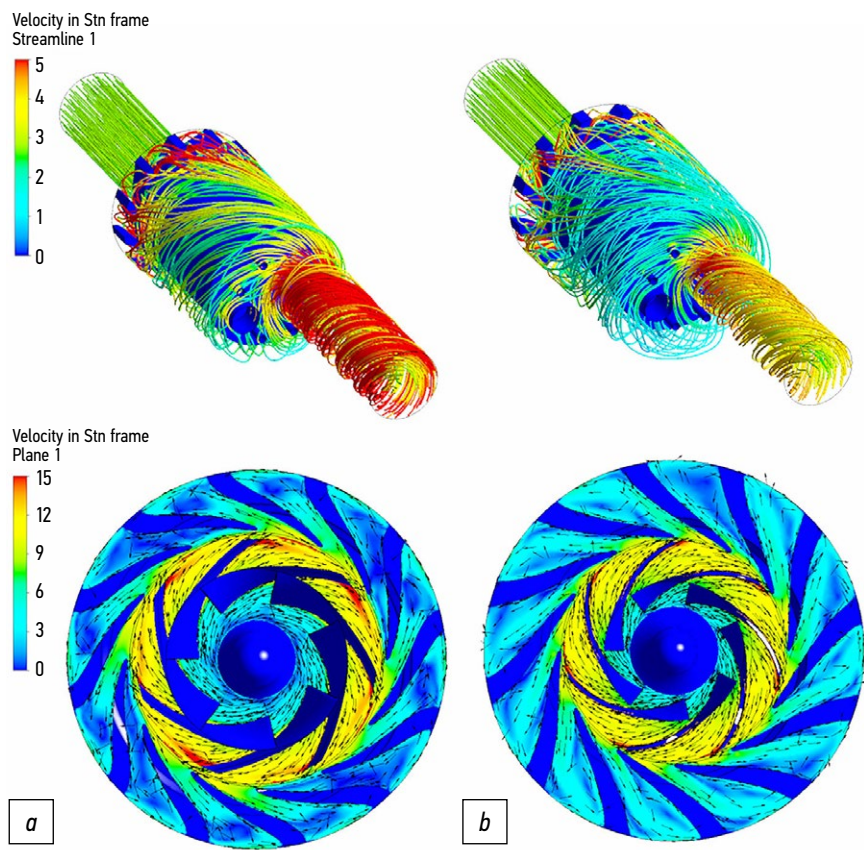


Fig. 4. Velocity fields in the initial (a) and the optimal (b) flow sections.
Рис. 4. Поля скоростей в исходной (a) и оптимальной (b) проточных частях.

the discharge pipe ($B/D_2 = 0.302$). These adjustments result in decreased flow speeds and lower hydraulic losses in the discharge device, as shown in Fig. 4.

CONCLUSIONS

1. The stochastic Latin hypercube sampling method has proven effective in identifying the global maximum of the pump’s hydraulic efficiency. This result can
2. Using the Latin hypercube sampling method, the hydraulic efficiency of the pump was increased by 7% compared to the initial flow part of the object of study.
3. The optimization results showed that an increase in the target function, specifically the hydraulic efficiency

of the pump, was largely achieved by widening the channels between the motor and the pump housings. This modification led to reduced flow speeds and lower hydraulic losses in the sta-tor elements of the flow part of the pump under study.

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.

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.

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.

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
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, Kulshova 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: IIUJUA. 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

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., Кренин 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

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: IIUJUA. doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-74-83

6. Валухов 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

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 Polytekhnicheskaya 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

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

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку