

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

А. А. Стасеев^{1,2}, А. А. Жарковский¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

²ООО «НордЭнергоГрупп Информационные технологии»,
Россия, 195009, г. Санкт-Петербург, наб. Свддловская, 18, литера АР

В статье представлена архитектура программного обеспечения, предназначенного для оптимизации проточных частей ступеней центробежных насосов. Описывается принцип выбора геометрических параметров, влияющих на значения напора и коэффициента полезного действия ступени. Обосновывается выбор количества точек в матрице эксперимента. С помощью изложенного в статье функционала производится оптимизация проточной части ступени консольного центробежного насоса. На основе полученных оптимальных параметров выполняется автоматизированное моделирование 3D-модели проточной части и проводятся CFD расчеты в пакете Ansys CFX.

Ключевые слова: оптимизация, САПР, корреляция, латинский гиперкуб, автоматизация, Python, центробежный насос, спиральный отвод.

Для цитирования: Стасеев А. А., Жарковский А. А. Разработка модуля оптимизации для системы автоматизированного проектирования ступени центробежного насоса // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2025. Т. 9, № 3. С. 75–82. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-75-82. EDN: NPYDJJ.



© Стасеев А. А., Жарковский А. А., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

DEVELOPMENT OF A MODULE OF DIRECT OPTIMIZATION METHODS FOR A TWO-DIMENSIONAL AUTOMATED DESIGN SYSTEM OF A CENTRIFUGAL PUMP STAGE

А. А. Staseyev^{1,2}, А. А. Zharkovskiy¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, Saint Petersburg, Polytechnicheskaya St., 29, 195251

²LLC "NordEnergoGroup Information Technologies",
Russia, Saint Petersburg, Sverdlovskaya Embankment, 18 AR, 195009

The paper describes the architecture of software designed to optimize the flow paths of centrifugal pump stages. The principle of selecting geometric parameters that affect the values of the head and efficiency of the stage is described. The number of points in the design of experiments is selected and a formula for the rating of the optimization calculation is proposed. Described functionality is used to perform optimization of the flow path of a stage of console centrifugal pump stage with a speed coefficient equal to 93 Based on the obtained geometric parameters, automated modeling of 3D models of the flow path is performed, which is used to perform CFD calculations in the Ansys CFX package.

Keywords: direct optimization, CAD, correlation, latin hypercube, automation, Python, centrifugal pump, spiral outlet.

For citation: Staseyev A. A., Zharkovskiy A. A. Development of a module of direct optimization methods for a two-dimensional automated design system of a centrifugal pump stage. *Omsk Scientific Bulletin*.



© Staseyev A. A., Zharkovskiy A. A., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

На данный момент оптимизация является одним из важных направлений в области насосостроения [1–7], позволяя модифицировать существующие проточные части, а также проектировать новые с высокими энергетическими качествами. Именно поэтому в рамках разработки программного обеспечения для системы автоматизирования проектирования центробежных насосов «САПР ЦН» была поставлена задача разработки модуля, позволяющего выполнять оптимизационные расчёты на базе 2D-методов расчета течения. Использование при оптимизации 2D-методов позволяет уменьшить затраты времени по сравнению с 3D-методами, которые используют для расчета течения пакеты вычислительной гидродинамики. Для оптимизации выбрана ступень консольного центробежного насоса с коэффициентом быстроходности $ns=93$. Параметры ступени приведены на рис. 1а, разрез ступени приведен на рис. 1б.

Полученный в рамках оптимизации с использованием 2D-методов расчета течения вариант проточной части (ПЧ), был затем рассчитан с использованием 3D-методов расчета течения в CFX для подтверждения значений напора и КПД ступени, рассчитанных в 2D-постановке.

1. Архитектура

Архитектура программного комплекса представлена на рис. 2. В качестве расчётного ядра используются расчётная платформа, разработанная в Высшей школе энергетического машиностроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [8–9].

Элементы расчётной цепочки были реализованы на основе legacy-кода на Fortran, поэтому разработанная архитектура является двухслойной; взаимо-

действие между слоями организовано с помощью интеграционной шины, расположенной между Fortran- и Python-слоями на рис. 2. Описание самих слоёв следующее:

1. Python-слой является интерактивным слоем, с помощью которого пользователь может взаимодействовать с Fortran-слоем и настраивать параметры оптимизационного расчёта. Предварительно с помощью данного слоя инициализируются все параметры расчёта по умолчанию, которые необходимы для расчёта, однако задаются пользователем, и в автоматическом режиме расчёта не могут быть получены. На основе полученной информации все генерируемые .bat-файлы для взаимодействия с Fortran-слоем будут содержать указанные параметры. Единственным исключением являются параметры, которые в дальнейшем будут включены в варьируемые параметры. После инициализации они будут перезаписаны в соответствии со значением, переданным из матрицы эксперимента оптимизационного расчёта. Стоит отметить, что параметры, добавленные в матрицу эксперимента, не всегда задаются в явном виде через .bat-файлы, именно поэтому в интеграционной шине также предусмотрен функционал по замене значений в .dat-файлах, получаемых после выполнения этапов расчёта. Комбинация функционала по замене как пользовательской, так и рассчитанной информации позволяет гибко настроить оптимизационную платформу.

2. Fortran-слой является расчётным ядром для выполнения оптимизации; вся информация, заданная пользователем в интерфейсе расчётной платформы через интеграционную шину, попадает в расчётную цепочку. Из-за необходимости ввода в командную строку некоторых параметров от пользователя при эксплуатации модулей расчётной цепочки в архитектуре появилась интеграционная шина.

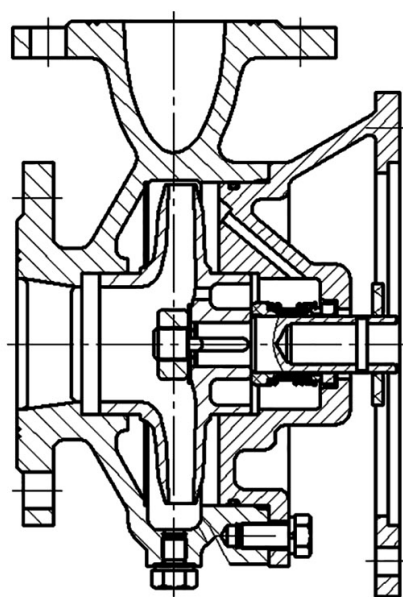


Рис. 1. Оптимизируемая ступень: а — техническое задание для ступени; б — разрез ступени
Fig. 1. Optimized stage: a — technical specifications for the stage; б — cross-section of the stage

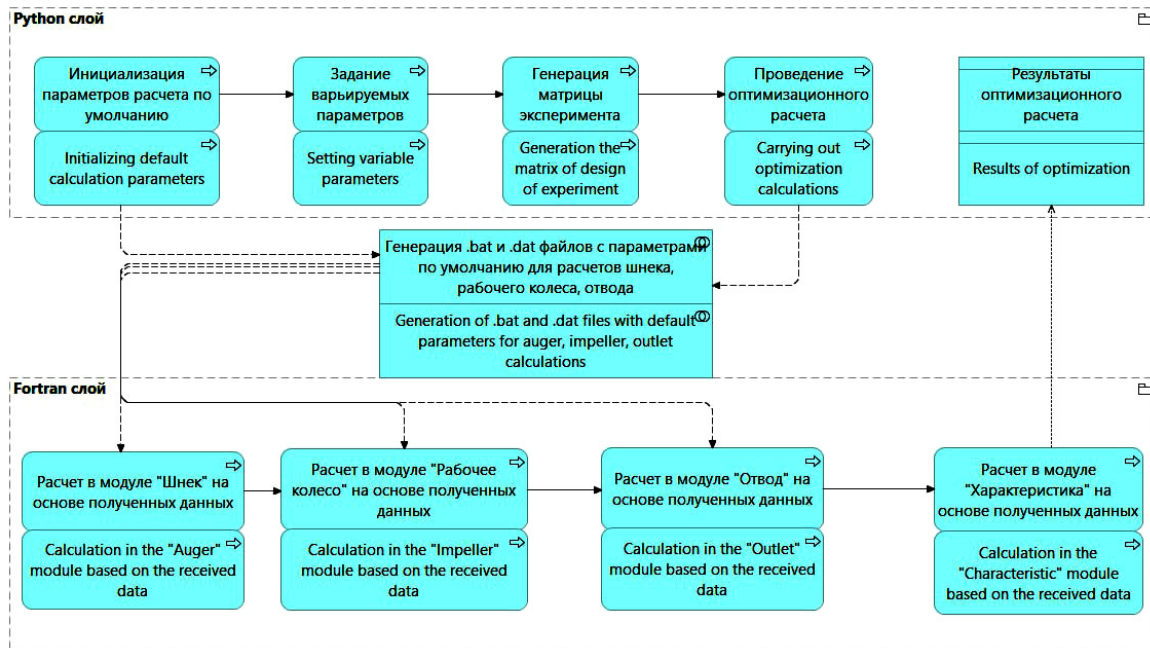


Рис. 2. Архитектура модуля оптимизации
Fig. 2. Architecture of optimization module

На основе взаимодействия слоев между собой алгоритм оптимизации можно описать следующим образом: пользователь инициализирует постоянные параметры расчёта в соответствии с теми, что использовались в первичном расчёте, далее выбирает экзогенные параметры и задаёт диапазоны их изменения. На основе этой информации в соответствии с выбранным типом генерации плана эксперимента создаётся матрица эксперимента. Каждая точка из оптимизационного плана по интеграционной шине передаётся в .bat- и .dat-файлы, после чего в автоматическом режиме производится расчёт. Результаты работы для каждого из рассчитанных вариантов возвращаются обратно из .dat-файла в интерфейс оптимизационной платформы, расположенной в Python-слое.

Очевидно, что при генерации матрицы эксперимента могут возникнуть геометрически невозможные комбинации параметров, именно поэтому в генератор .bat-файлов, расположенный в интеграционной шине для некоторых функций были предусмотрены сторожевые таймеры, которые позволяют прервать процесс расчёта точки эксперимента, которая попала в бесконечную петлю.

2. Генерация плана эксперимента

После описания архитектуры оптимизационной платформы рассмотрим функционал, который в неё заложен. В качестве метода генерации матриц экспериментов в оптимизационную платформу был заложен метод «Латинский гиперкуб», который широко используется в оптимизационных расчётах проточных частей центробежных насосов [4, 10–13].

Пример визуализации сгенерированной матрицы эксперимента представлен на рис. 3. В латинском гиперкубе нет ограничения по количеству точек. Следовательно, пользователю предоставлена возможность установить желаемое количество точек с помощью интерфейса оптимизационной платформы. Генерация плана эксперимента производится с помощью библиотеки Python pyDOE [14].

3. Принцип выбора значимых параметров

В качестве критерия оценки влияния параметров, выбранных в рамках создания матрицы экспериментов для выполнения оптимизационного расчёта, используется коэффициент корреляции. Однако перед тем как вычислить коэффициенты корреляции, все данные предварительно необходимо нормализовать из-за наличия разных диапазонов и размерностей экзогенных параметров. Могут встречаться следующие размерности — метры, миллиметры, градусы. Наличие различных единиц длины обусловлено особенностями legacy-кода, который используется в расчётных цепочках. Нормализация выполняется с помощью Z-оценки. Для каждого значения в отдельном столбце матрицы используется формула (1):

$$z = \frac{x_i - \mu}{\sigma}, \quad (1)$$

где z — стандартизированное значение; x_i — текущее значение экзогенного параметра; μ — среднее арифметическое всех значений экзогенного параметра в столбце матрицы эксперимента; σ — стандартное отклонение, вычисляется по формуле (2):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (2)$$

Для нормализации созданной матрицы эксперимента используется функционал библиотеки SciPy для Python [15].

На первом этапе разработки программного модуля использовался исключительно коэффициент корреляции Пирсона, вычисляемый по формуле (3), однако выбранные геометрические (экзогенные) параметры (диаметр рабочего колеса, ширина выхода из рабочего колеса и т. д.) могут иметь нелинейную связь с эндогенными параметрами (напор и КПД ступени). Именно поэтому была добавлена возможность переключения метода расчёта коэффициента корреляции между методикой Пирсона,

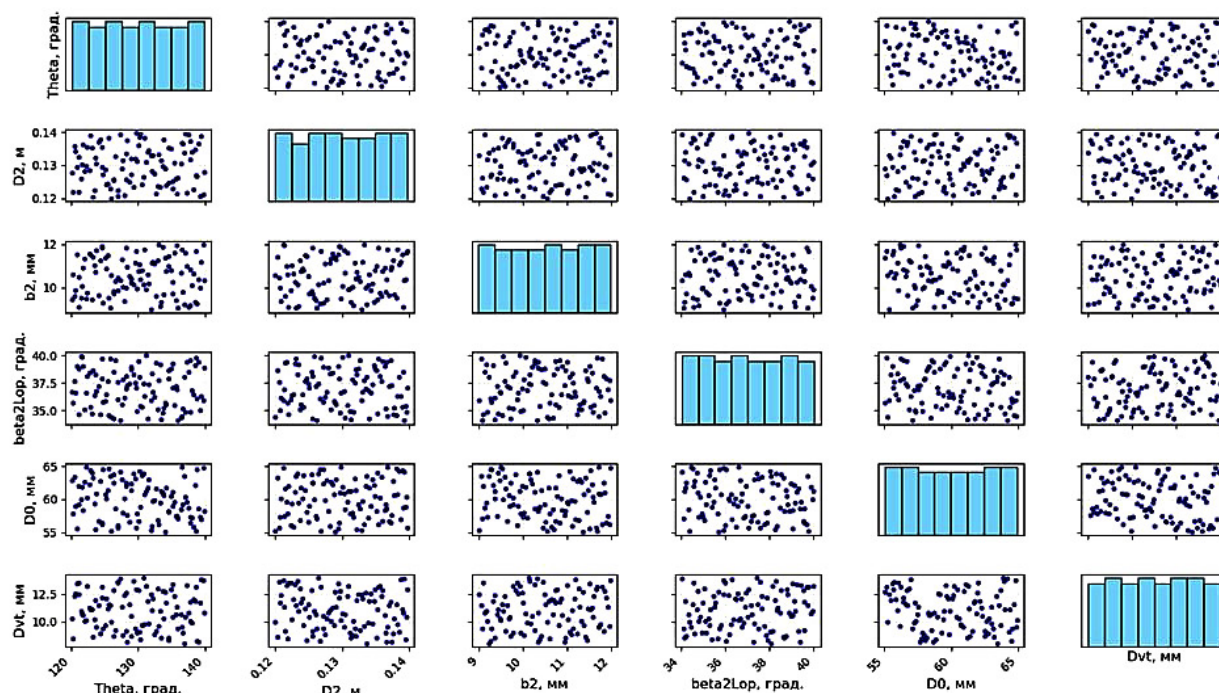


Рис. 3. Матрица эксперимента, сгенерированная с помощью Латинского гиперкуба
(Theta — угол охвата лопасти; D2 — диаметр рабочего колеса; b2 — ширина рабочего колеса на выходе;
beta2Lop — угол лопасти на выходе из рабочего колеса; Dvt — диаметр втулки)
Fig. 3. Latin Hypercube-designed experiment matrix
(Theta — blade wrap angle; D2 — diameter of impeller;
b2 — impeller exit width; beta2Lop — blade exit angle; Dvt — diameter of hub)

Кендалла и Спирмена, вычисляемых по формулам 3, 4 и 5 соответственно, для более точной оценки корреляции между экзогенными и эндогенными параметрами.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

где $\bar{x}$ — среднее арифметическое всех значений экзогенного параметра в столбце матрицы эксперимента; $\bar{y}$ — среднее арифметическое всех значений эндогенного параметра в столбце матрицы эксперимента; n — количество рассчитанных объектов в матрице эксперимента.

$$\tau = 1 - \frac{4}{n \cdot (n - 1)} R, \quad (4)$$

где n — количество точек в матрице эксперимента; R — число инверсий в рангах экзогенной переменной после сортировки по возрастанию эндогенного параметра.

$$\rho = 1 - \frac{6}{n \cdot (n^2 - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (R_i - S_i)^2, \quad (5)$$

где n — количество точек в матрице эксперимента; R_i — ранг наблюдения i -го эндогенного параметра после сортировки по возрастанию; S_i — ранг наблюдения i -го экзогенного параметра после сортировки по возрастанию. Коэффициенты корреляции считаются с помощью функции библиотеки Pandas [16].

Нужно отметить, что низкий коэффициент корреляции (меньше 0,2) свидетельствует о том, что

выбранные экзогенные параметры в матрице эксперимента сильно не коррелируют между собой и являются уникальными параметрами. Также низкая корреляция экзогенного параметра с эндогенными не всегда означает, что параметр никак не влияет на эндогенные параметры. Его влияние возможно в комбинации с другими переменными. Для учёта потенциально возможного влияния низко коррелирующих параметров было предложено считать значимыми переменные, у которых модуль среднего арифметического коэффициентов корреляции с эндогенными параметрами более 0,1.

4. Выбор количества точек в эксперименте

Следующим этапом оптимизационного расчёта является определение количества точек в матрице эксперимента, после которого эндогенные параметры не будут радикально изменяться. Из-за того что в реализованном функционале генерации плана по латинскому гиперкубу отсутствует фиксация генерации случайных чисел, каждый эксперимент, сгенерированный с одинаковым количеством точек, будет иметь разные матрицы экспериментов. Наличие возможности получить отрицательные объёмы при дискретизации расчётной области лучших кандидатов было принято оценивать решениями не отдельных лучших кандидатов в оптимизационном расчёте, а сразу всей подборки в рамках одного оптимизационного расчёта. Следовательно, появилась необходимость использовать безразмерную метрику для оценки результатов оптимизационных расчётов.

В рамках решения данной задачи была предложена формула (6), позволяющая рассчитать рейтинг проведенного оптимизационного расчёта:

$$R_{opt} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\omega_H \cdot \left(1 - \frac{|H_i - H_{tz}|}{\max(|H - H_{tz}|)} \right) + \omega_{KPD} \cdot \left(\frac{\eta_i - \min(\eta)}{\max(\eta) - \min(\eta)} \right) \right)}{n}, \quad (6)$$

где n — количество точек в матрице эксперимента оптимизационного расчёта; ω_H — вес полученного напора ступени; ω_{KPD} — вес полученного КПД ступени; H_i — значение полученного напора ступени в i -той точке матрицы эксперимента; η_i — значение полученного КПД ступени в i -й точке матрицы эксперимента; H_{tz} — требуемое по техническому заданию значение напора ступени; $\max(|H - H_{tz}|)$ — максимальное отклонение напора в текущем оптимизационном расчёте от требуемого по техническому заданию; $\min(\eta)$ — минимальное значение КПД в текущем оптимизационном расчёте; $\max(\eta)$ — максимальное значение КПД в текущем оптимизационном расчёте.

Для поиска количества точек в оптимизационном расчёте, после которого рейтинг проводимого расчёта не изменится при увеличении количества точек, было проведено 15 расчётов с увеличением количества точек на 25 в каждом последующем эксперименте, начиная с 25-ти точек и заканчивая 375. Вес напора ступени был принят равным 0,5;

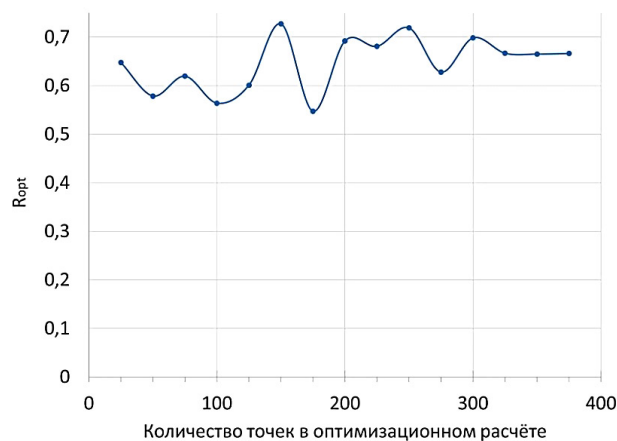


Рис. 4. Зависимость рейтинга оптимизационного расчёта от количества точек
Fig. 4. Relationship between the optimization run score and the sample size

для КПД — 0,5. Визуализация зависимости рейтинга оптимизационного расчёта от количества точек в нём приведена на рис. 4.

Исходя из полученного графика, можно сделать вывод, что после 325-й точки рейтинг оптимизационного расчёта стабилизируется, следовательно, достаточно проводить расчёт при 325-ти точках. Следовательно, если при увеличении количества точек

Таблица 1. Диапазон изменения экзогенных параметров
Table 1. Endogenous variable domain

Наименование параметра	Минимальное значение	Максимальное значение
Угол охвата лопасти (θ), град.	– 7,4 %	+ 7,4 %
Диаметр рабочего колеса ($D2$), м	– 7 %	+ 12,4 %
Ширина канала на выходе из рабочего колеса ($b2$), м	– 18,3 %	+ 42,9 %
Угол установки лопасти на выходе из рабочего колеса ($\beta_{2\text{лоп}}$), град.	– 10,5 %	+ 7,9 %
Диаметр входа в рабочее колесо ($D0$), м	– 3,5 %	+ 7 %
Диаметр втулки ($D\text{вт}$), мм	– 20 %	+ 40 %
$b3/b2$	– 38,7 %	+ 3,25 %
Коэффициент запаса улитки (Ks)	– 14,3 %	+ 4,8 %

Таблица 2. Коэффициенты корреляции
Table 2. Coefficients of correlation

Коэффициент корреляции Пирсона								
Параметр	θ	$D2$	$b2$	$\beta_{2\text{лоп}}$	$D0$	$D\text{вт}$	$b3/b2$	Ks
H	0,01	0,14	– 0,15	– 0,01	0,03	0,06	– 0,84	0,4
КПД	0,01	0,11	– 0,15	– 0,01	0,03	0,06	– 0,85	0,41
Коэффициент корреляции Спирмена								
H	0,01	0,18	– 0,17	0,02	– 0,04	0,06	– 0,86	0,36
КПД	0,01	0,12	– 0,16	0,02	– 0,04	0,06	– 0,87	0,37
Коэффициент корреляции Кендалла								
H	0,01	0,11	– 0,11	0,01	– 0,03	0,04	– 0,67	0,25
КПД	0,01	0,09	– 0,11	0,01	– 0,03	0,04	– 0,67	0,25
Среднее значение коэффициентов корреляции								
H	0,01	0,14	– 0,14	0,007	– 0,013	0,053	– 0,79	0,34
КПД	0,01	0,11	– 0,14	0,007	– 0,013	0,053	– 0,8	0,34

Таблица 3. Параметры выбранных точек
Table 3. Selected points parameters

	$D2$, м	$b2$, м	$b3/b2$	Ks
Кандидат №1	0,1383	0,00807	1,81	1,095
Кандидат №2	0,1334	0,00773	1,83	1,065
Кандидат №3	0,14	0,008	1,8	1,069
Кандидат №4	0,1296	0,0012	1,86	1,073

Таблица 4. Результаты расчёта оптимизированных вариантов проточной части
Table 4. Results of calculation of the optimized variant of the flow path

Параметр	Исходный вариант	2D-расчёт		3D-расчёт	
		Абсолютное значение	Превышение ТЗ	Абсолютное значение	Превышение ТЗ
		1 кандидат			
H, м	17,514	20,004	+ 0 %	20,312	+ 1,56 %
КПД, %	62,26	71,22	+ 8,96 %	70,44	+ 8,18 %
		2 кандидат			
H, м	17,514	20,266	+ 1,33 %	20,781	+ 3,91 %
КПД, %	62,26	71,27	+ 9,01 %	70,76	+ 8,5 %
		3 кандидат			
H, м	17,514	20,183	+ 0,92 %	20,478	+ 2,39 %
КПД, %	62,26	71,16	+ 8,9 %	70,33	+ 8,07 %
		4 кандидат			
H, м	17,514	20,02	+ 0,1 %	20,364	+ 1,82
КПД, %	62,26	70,32	+ 8,1 %	69,45	+ 7,12

в оптимизационном расчёте относительное изменение рейтинга не превышает одного процента, то увеличение количества точек не является целесообразным.

5. Результаты расчёта

Для выявления наиболее значимых геометрических параметров для рассматриваемой ступени заданы все доступные на данный момент экзогенные параметры, а именно: угол охвата лопасти, диаметр рабочего колеса, ширина канала на выходе из рабочего колеса, выходной угол лопасти, диаметр входа в рабочее колесо, диаметр втулки, отношение ширины безлопаточного диффузора к ширине канала на выходе из рабочего колеса (далее $b3/b2$) и коэффициент запаса улитки, позволяющий либо увеличить габариты спирального отвода, уменьшая потери напора в нем, либо уменьшать габариты, повышая потерю напора. Для создания матрицы эксперимента данного оптимизационного расчёта использовался латинский гиперкуб на 325 расчётных точек. Диапазоны изменения параметров относительно оригинальных значений приведены в табл. 1.

По результатам расчёта были получены коэффициенты корреляции, представленные в табл. 2.

Исходя из анализа данных, представленных в табл. 2, и учитывая вывод о том, что экзогенные параметры с коэффициентом корреляции выше 0,1 оказывают наибольшее влияние, были выделены следующие значимые параметры: коэффициент запаса улитки Ks , отношение ширины канала безлопаточного диффузора к ширине канала на выходе из рабочего колеса $b3/b2$, диаметр рабочего колеса и ширина канала на выходе из рабочего колеса.

С помощью разработанной оптимизационной платформы были проведены 2D-оптимизационные

расчёты с использованием четырёх наиболее значимых параметров: $D2$, $b2$, $b3/b2$, Ks . Точки с более оптимальными значениями этих параметров приведены в табл. 3.

Далее для ПЧ ступеней с полученными оптимальными значениями параметров и с помощью встроенного функционала по автоматизированному созданию 3D-моделей элементов проточной части [8] были подготовлены данные для импорта геометрии в пакеты вычислительной гидродинамики (Ansys CFX).

Для рабочих колес были сгенерированы расчетные области межлопастного канала с помощью функционала DesignModeler. Структурированная расчетная сетка для межлопастных каналов была создана с помощью пакета Ansys TurboGrid. Для домена рабочего колеса среднее количество элементов сетки составило 290 тыс.

Создание неструктурированной расчетной сетки спиральных отводов производилось с помощью сеточного генератора Ansys ICEM. Среднее количество элементов для созданных сеток составило около 1,5 млн.

CFD расчеты проводились в пакете Ansys CFX. Расчеты выполнялись в стационарной постановке на расчетном расходе. В качестве модели турбулентности использовалась модель SST. На входе в расчетную область задавалась полная энергия, равная 1 атм, а на выходе — массовый расход, соответствующий расчетному ($0,00694 \text{ м}^3/\text{с}$). Количество итераций — 1500. Результаты 2D- и 3D-расчётов приведены в табл. 4. Относительные значения напора ступени для 2D- и 3D-расчётов вычислены относительно напора по техническому заданию (20 м). Гистограмма, отображающая разницу между 2D- и 3D-расчётами, приведена на рис. 5.

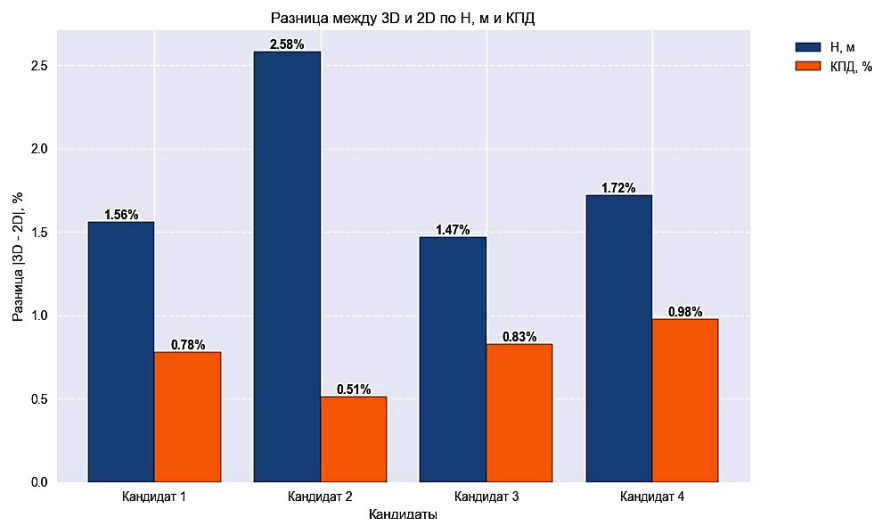


Рис. 5. Разница по превышению по ТЗ между 2D- и 3D-расчётами
Fig. 5. Difference in exceeding technical requirements between 2D- and 3D-calculations

Закключение и выводы

С использованием разработанного программного обеспечения:

1. КПД ступени в результате оптимизации повышен на 8 % при малом отклонении напора ступени относительно требований технического задания.

2. Результаты расчетов интегральных параметров с использованием 2D- и 3D-расчетов имеют малое расхождение: $\Delta H_{\text{среднее}} = 1,833 \%$, $\Delta \eta_{\text{среднее}} = 0,775 \%$.

3. Сокращено время оптимизационных расчётов по сравнению с классическими 3D-подходами. На расчёт одной точки в матрице эксперимента уходит в среднем 6 секунд на персональном компьютере с объемом оперативной памяти 16 ГБ и 8-ядерным процессором с частотой 3.2–4.4 ГГц.

4. Предложена формула расчета рейтинга оптимизационного расчета. Если относительное изменение рейтинга оптимизационного расчета не превышает одного процента при увеличении точек в матрице эксперимента — повышение количества точек не является целесообразным.

5. Предложено оценивать влияние входных (экзогенных) параметров на интегральные (эндогенные) параметры с помощью коэффициентов корреляции Пирсона, Спирмена и Кендалла. Считать значимыми экзогенные параметры, у которых модуль среднего арифметического коэффициента корреляции с эндогенными параметрами больше 0,1.

В дальнейшем планируется расширение функционала оптимизационной платформы путём использования поверхности отклика, метамоделей на основе нейросетей, генетического подхода и использования большего числа геометрических параметров ступени.

Список источников / References

1. Tian F., Yang C., Zhang E. [et al.]. Design Optimization of hydraulic machinery based on ISIGHT software: A review of methods and applications. *Water*. 2023. Vol. 15, no. 11. P. 1–15. DOI: 10.3390/w15112100.
2. Кляев А. С., Федоров А. С., Иванов Е. А., Жарковский А. А., Борщев И. О. Выбор типа отводящего устройства и оптимизация проточной части многоступенчатого центробежного насоса низкой быстроходности // Вестник Московского

государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2023. № 2 (145). С. 98–113. DOI: 10.18698/0236-3941-2023-2-98-113. EDN: TMONKW.

Klyuyev A. S., Fedorov A. S., Ivanov E. A., Zharkovskiy A. A., Borshchev I. O. Vybora tipa otvodyashchego ustroystva i optimizatsiya protochnoy chasti mnogostupenchatogo tsentrobezhnogo nasosa nizkoy bystrokhodnosti [Selection of the diffuser type and optimization of the flow path part of a low speed multistage centrifugal pump]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Bauman. Seriya «Mashinostroyeniye»*. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*. 2023. No. 2 (145). P. 98–113. DOI: 10.18698/0236-3941-2023-2-98-113. EDN: TMONKW. (In Russ.).

3. Волков А. В., Парыгин А. Г., Вихлянцев А. А., Дружинин А. А. К вопросу об оптимизации проточной части рабочих колёс центробежных насосов // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 11, № 4. С. 311–318. DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-4-311-318. EDN: YTOLBJ.

Volkov A. V., Parygin A. G., Vikhlyantsev A. A., Druzhinin A. A. K voprosu ob optimizatsii protochnoy chasti rabochnik kolès tsentrobezhnykh nasosov [On optimization of flow passages of impellers of centrifugal pumps]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki. Safety and Reliability of Power Industry*. 2018. Vol. 11, no. 4. P. 311–318. DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-4-311-318. EDN: YTOLBJ. (In Russ.).

4. Wang W., Pei J., Yuan S. [et al.]. Application of different surrogate models on the optimization of centrifugal pump. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016. Vol. 30. P. 567–574. DOI: 10.1007/s12206-016-0110-0.

5. Jaiswal A. K., Siddique M. H., Ranjan A. Surrogate-based design optimization of a centrifugal pump impeller. *Engineering Optimization*. 2022. Vol. 54, no. 8. P. 1395–1412. DOI: 10.1080/0305215X.2021.1932867.

6. Wu T. X., Wu D., Gao S. Y. [et al.]. Multi-objective optimization and loss analysis of multistage centrifugal pumps. *Energy*. 2023. Vol. 284. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128638.

7. Li H., Han Y., Shi W. [et al.]. Automatic optimization of centrifugal pump based on adaptive single-objective algorithm and computational fluid dynamics. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2022. Vol. 16, no. 1. P. 2222–2242. DOI: 10.1080/19942060.2022.2143901.

8. Стасеев А. А., Жарковский А. А. Автоматизированное проектирование 3D-моделей элементов проточной части ступени шнеко-центробежного насоса // Известия МГТУ «МAMI». 2024. Т. 18, № 3. С. 212–221. DOI: 10.17816/2074-0530-632427. EDN: USRPXF.

Staseyev A. A., Zharkovskiy A. A. Avtomatizirovannoye proyektirovaniye 3D-modeley elementov protochnoy chasti stupeni shneko-tsentrobezhnogo nasosa [Automated design of the 3D models of the elements of the flow part of the stage of a screw-centrifugal pump]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2024. Vol. 18, no. 3. P. 212–221. DOI: 10.17816/2074-0530-632427. EDN: USRPXF. (In Russ.).

9. Стасеев А. А., Жарковский А. А. Разработка системы автоматизированного проектирования спирального отвода центробежных насосов // Гидравлические и теплотехнические системы и агрегаты: материалы XXVIII Междунар. науч.-техн. конф. Москва: Мир науки, 2024. С. 233–239.

Staseyev A. A., Zharkovskiy A. A. Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya spiral'nogo otvoda tsentrobeznykh nasosov [Development of an automated design system for a spiral outlet of centrifugal pumps]. *Gidravlicheskiye i teplotekhnicheskiye sistemy i agregaty. Hydraulic and Thermal Systems and Units*. Moscow, 2024. P. 233–239. (In Russ.).

10. Santner T. J., Williams B. J., Notz W. I. The design and analysis of computer experiments. Springer New York, 2018. 436 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-8847-1.

11. Namazizadeh M., Gevari M. T., Mojaddam M., Vajdi M. Optimization of the splitter blade configuration and geometry of a centrifugal pump impeller using design of experiment. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2020. Vol. 13, no. 1. P. 89–101. DOI: 10.29252/jafm.13.01.29856.

12. Peng G., Ma L., Hong S. [et al.]. Optimization design and internal flow characteristics analysis based on Latin hypercube sampling method. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2025. Vol. 50. P. 2715–2754. DOI: 10.1007/s13369-024-09229-6.

13. Arcentales X. A., Arcentales D. A., Montealegre W. Design of rotors in centrifugal pumps using the topology optimization method and parallel computing in the cloud. *Machines*. 2025. Vol. 13, no. 4. DOI: 10.3390/machines13040307.

14. The experimental design package for Python. URL: <https://pythonhosted.org/pyDOE/> (accessed: 01.05.2025).

15. SciPy StandardScaler. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.preprocessing.StandardScaler.html> (accessed: 26.04.2025).

16. Pandas. API Reference. URL: <http://pandas.pydata.org/docs/reference/api/pandas.DataFrame.corr.html> (accessed: 29.04.2025).

СТАСЕЕВ Александр Александрович, аспирант Высшей школы энергетического машиностроения Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург; младший разработчик отдела развития прикладного программного обеспечения ООО «НордЭнергоГрупп Информационные технологии», г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 4777-3813

AuthorID (РИНЦ): 1178129

ORCID: 0000-0002-4851-804X

Адрес для переписки: greenalh@gmail.com

ЖАРКОВСКИЙ Александр Аркадьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор Высшей школы энергетического машиностроения СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 3637-7853

AuthorID (РИНЦ): 320919

ORCID: 0000-0002-3044-8768

AuthorID (SCOPUS): 7004534701

ResearcherID: T-3278-2018

Адрес для переписки: azharkovsky@gmail.com

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 15.07.2025; одобрена после рецензирования 30.07.2025; принята к публикации 20.08.2025.

STASEYEV Aleksandr Aleksandrovich, Postgraduate of the Higher School of Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg; Junior Developer of the Application Software Development Department, LLC "NordEnergoGroup Information Technologies", Saint Petersburg.

SPIN-code: 4777-3813

AuthorID (RSCI): 1178129

ORCID: 0000-0002-4851-804X

Correspondence address: greenalh@gmail.com

ZHARKOVSKIY Aleksandr Arkadyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Higher School of Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg.

SPIN-code: 3637-7853

AuthorID (RSCI): 320919

ORCID: 0000-0002-3044-8768

AuthorID (SCOPUS): 7004534701

ResearcherID: T-3278-2018.

Correspondence address: azharkovsky@gmail.com

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 15.07.2025; approved after reviewing 30.07.2025; accepted for publication 20.08.2025.