

УДК 621.224.2

Оптимизационное проектирование отсасывающей трубы низконапорной радиально-осевой гидротурбины

М. Омран, А.А. Жарковский, Д.Г. Свобода

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Optimization design of the draft tube for a low-head Francis turbine

M. Omran, A.A. Zharkovskii, D.G. Svoboda

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Предложена методика проектирования отсасывающей трубы радиально-осевой гидротурбины низкого напора, основанная на законе распределения площади поперечного сечения трубы по длине, что позволяет существенно повысить эффективность оптимизационного процесса. В среде MATLAB реализована автоматизация процесса проектирования. Оптимизация проведена поэтапно с применением методов построения поверхностей отклика, предварительно верифицированных на тестовой задаче. Результаты исследования показали увеличение коэффициента полезного действия радиально-осевой гидротурбины, в том числе в режимах частичной нагрузки, а также повышение кавитационных характеристик проточной части.

EDN: BYMHAT, <https://elibrary/bymhat>**Ключевые слова:** радиально-осевая гидротурбина, отсасывающая труба, оптимизационное проектирование, поверхность отклика, кавитационные характеристики

The paper presents a method developed by the authors for designing the draft tube of a low-head Francis turbine. The methodology is based on the law of cross-sectional area distribution along the tube, which significantly improved the efficiency of the optimization process. The design procedure was automated using MATLAB. Optimization was performed in stages using response surface methodology, preliminarily verified on a test case. The results demonstrated an increase in turbine efficiency, including under partial load conditions, along with enhanced cavitation performance of the flow path.

EDN: BYMHAT, <https://elibrary/bymhat>**Keywords:** low-head Francis turbine, draft tube, optimization design, response surface, design, cavitation characteristics

Отсасывающая труба (ОТ), являющаяся важным элементом радиально-осевой (РО) гидротурбины (ГТ), служит для восстановления кинетической энергии воды за рабочим колесом (РК), преобразуя ее в энергию давления [1]. Эта область проточной части имеет особое значение для РОГТ, где наблюдается выход потока рабочей жидкости (РЖ) из РК с высокой скоростью [2].

Оптимально спроектированная ОТ снижает энергетические потери и улучшает кавитационные характеристики, тем самым повышая общий коэффициент полезного действия (КПД) гидроагрегата [3]. Для адаптации к колебаниям энергопотребления РОГТ часто эксплуатируются в режимах частичной нагрузки. Структура потока на выходе из РК значительно изменяется при смещении рабочей точки на

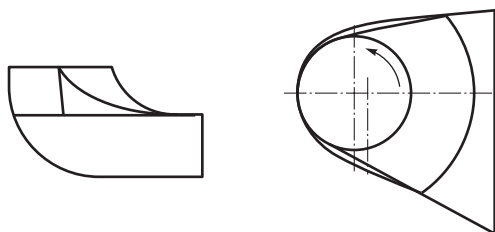


Рис. 1. Конструктивная схема ОТ

универсальной характеристике. При частичной нагрузке в ГТ возникают такие нестационарные явления, как вращающийся вихревой жгут [4], что приводит к необходимости оптимизировать ОТ для достижения наилучшего КПД при работе в разных условиях.

В состав ОТ входят три основных элемента: конический участок, коленообразный изгиб и выходной диффузор. В работе [5] приведена конструктивная схема ОТ для поворотно-лопастных ГТ с изогнутой осью, включающая в себя диффузорный участок, колено и горизонтальный выходной диффузор. Форма ОТ описана восемнадцатью геометрическими параметрами. Как показано в работе [6], характеристики колена (рис. 1) определены в зависимости от напора ГТ.

Согласно данным работы [7], конструкция ОТ разделена на три участка, геометрические параметры которых регламентированы отраслевым стандартом ОСТ 108.122.01–76.

В исследовании [8] при параметрическом оптимизационном проектировании ОТ структурно разделяли на три участка: конический с линейным возрастанием диаметра сечения; колено с изменением сечения из круглого в прямоугольное со скругленными углами, где форма изгиба задана кривыми Безье; выходной патрубок. Критериями оптимизации выступали коэффициенты восстановления давления и гидравлических потерь.

В работе [9] рассмотрена поверхность тороидальной ОТ, состоящая из двух сегментов: поверхностей колена и выходного диффузора. Конструктивно элемент включал в себя симметричные левую и правую боковые стенки, тороидальный верхний участок коленного изгиба, верхнюю плоскость диффузора и общее основание. Верхняя часть диффузора образована плоской поверхностью, ориентированной ортогонально оси OZ и совпадающей с верхним профилем диффузора. Тороидальный участок колена представлял собой поверхность вращения вокруг оси OZ , конфигурация которой за-

дана дугой окружности, обеспечивающей плавный переход между образующей входного конуса и верхним контуром колена.

Такая методика построения поверхностей тороидальной ОТ позволяет менять ее форму, варьируя девятнадцать параметров в процессе оптимизации [9]. Результаты тестовых расчетов с использованием предложенной параметрической модели продемонстрировали прирост КПД ГТ на 0,15 %. Существенным достоинством методики является низкая ресурсоемкость генерации расчетной сетки, что критически важно при оптимизации геометрических параметров.

Современные подходы к проектированию ОТ, базирующиеся на оптимизационных алгоритмах, обеспечивают повышение энергетической эффективности ГТ и улучшение их кавитационных характеристик.

Цель работы — оптимизационное проектирование ОТ, включающее в себя разработку адаптивной формы для управления потоком, автоматизацию проектных процедур, решение вопросов параметрического моделирования и численной оптимизации.

Методика и автоматизация проектирования ОТ. Разработанная методика проектирования ОТ предполагает параметризацию изменения площади поперечного сечения по длине ОТ, разделенной на три участка, с заданием геометрических параметров через двенадцать контрольных сечений (рис. 2).

Поперечное сечение A совпадает с выходным сечением РК. Площади сечений конуса, имеющего круглое поперечное сечение, линейно увеличиваются по длине, диаметры окружности двух оснований конуса совпадают с диаметром выхода из РК и диаметром входа в колено.

Размеры поперечных сечений участков 1–В определяются законом распределения площадей по длине ОТ. Колено — самая важная часть ОТ, так как форма поперечного сечения меняется с круглой на прямоугольную при изменении направления потока. Колено разделено на десять секций, форма поперечных сечений которых изменяется, как показано на рис. 3.

Размер круглого сечения № 1 (соответствует большему основанию конуса диффузора за РК) в коленном участке $b_i = 0$ (рис. 3), а радиус r_i рассчитывается на основе приведенной площа-

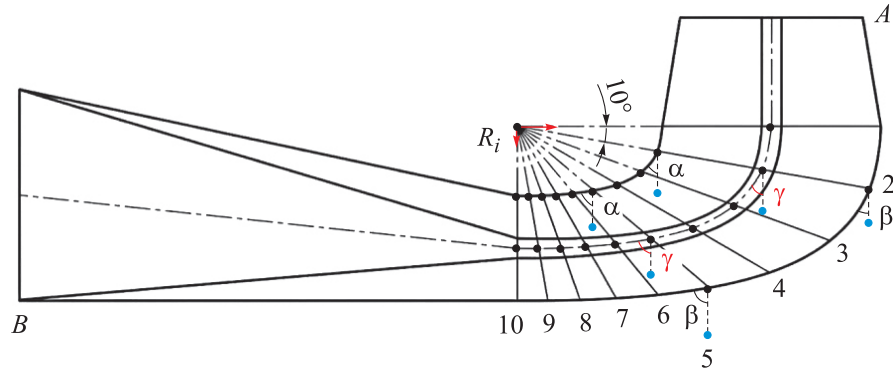


Рис. 2. Схема ОТ в меридианной плоскости

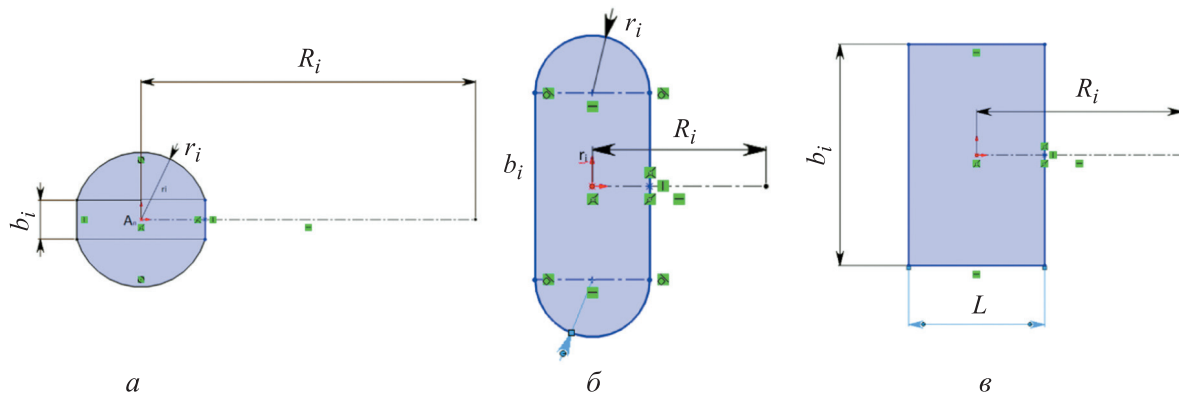


Рис. 3. Формы сечений колена ОТ:
 а — сечение в начале колена (2); б — переходные сечения колена (1-10);
 в — сечения выходного патрубка (10-B)

ди сечения A_i согласно заданному закону распределения сечений вдоль ОТ. Дополнительно определяется параметр R_i , представляющий собой расстояние от центра i -го сечения до начала координатной системы.

В сечениях 2-10 наблюдается прогрессирующий рост параметра b_i , сопровождаемый соответствующим уменьшением радиуса r_i . Такое изменение геометрических параметров эквивалентно перераспределению площадей: сокращению круглой составляющей A_k при одновременном увеличении прямоугольной составляющей A_n . Суммарная площадь поперечного сечения определяется как

$$A_i = A_k + A_n + \pi r_i^2 + 2r_i b_i.$$

Оптимизация геометрических параметров r_i , b_i и R_i для каждого сечения направлена на получение максимально обтекаемой формы ОТ. Для достижения этой цели введена переменная x_i , характеризующая долю круглой составляющей в общей площади i -го поперечного сечения:

$$A_k = x_i A_i; \quad A_n = (1 - x_i) A_i.$$

Параметр R_i определяется через положение центров сечений (см. рис. 2, штрихпунктирная линия), формируемое тремя участками: вертикальным отрезком А-1; участком 10-B, геометрические параметры которого зависят от площади сечения В; сплайн-кривой 1-10, обеспечивающей гладкое сопряжение отрезков А-1 и 10-B с касанием на обеих границах.

Такая параметризация гарантирует максимальную гладкость ОТ при заданной высоте колена.

Угловые параметры $\Delta\beta_i$, $\Delta\alpha_i$ и $\Delta\gamma_i$, характеризующие изменение ориентации между смежными сечениями для трех контрольных линий (см. рис. 2), демонстрируют следующую закономерность: идентичные значения этих параметров для всех сечений обеспечивают формирование гидродинамически гладкой поверхности ОТ. В ходе итерационного анализа определяется переменная X , количественно оценивающая степень единообразия угловых изменений $\Delta\beta_i$, $\Delta\alpha_i$ и $\Delta\gamma_i$. Оптимальное значение X соответствует максимальной гладкости геометрических переходов и, как следствие,

наилучшим гидродинамическим характеристикам ГТ.

Проектирование ОТ автоматизировано с помощью предложенной методики в среде MATLAB с заданием закона изменения площади поперечного сечения по длине ОТ, высоты колена и конуса с целью определения всех необходимых параметров.

Проектирование ОТ РОГТ низкого напора РО75 выполнено в соответствии со стандартом ОСТ 108.122.01–76 и предложенным законом изменения площади поперечного сечения (рис. 4, б). На рис. 4, г приведены результаты итеративного исследования, позволяющего определить переменную X для каждого сечения. В результате можно убедиться в совпадении углов $\Delta\beta_i$ и $\Delta\alpha_i$ (рис. 4, д и е), соответствующих

углам $\Delta\gamma_i$ срединной линии (сплайна) в коленных сечениях 2–10. Завершающим этапом стала визуализация горизонтальной и вертикальной проекций спроектированной ОТ (рис. 4, а и в).

Верификация путем 3D-расчетов течения вязкой РЖ. Разработка 3D-модели ОТ выполнена в редакторе ANSYS DesignModeler. По результатам выбора математической модели для расчета течения вязкой РЖ в проточной части РОГТ низкого напора РО75, предложенной в работе [10], проведено трехмерное моделирование течения потока РЖ для всей расчетной области этой ГТ, включая спиральную камеру (СК), статор, направляющий аппарат (НА), РК и ОТ, спроектированную по разработанной методике.

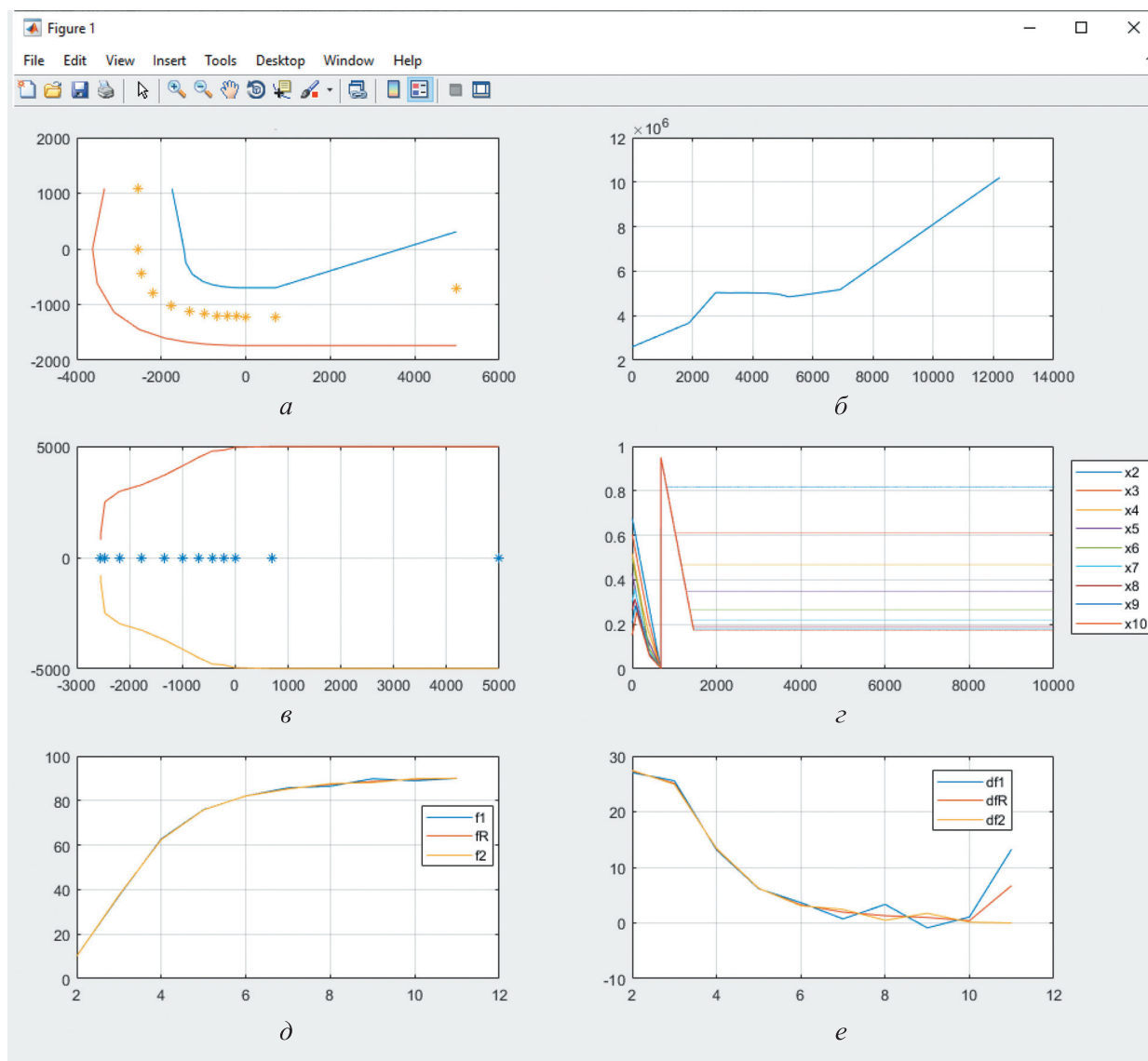


Рис. 4. Результаты проектирования ОТ РОГТ низкого напора РО75

Граничное условие задано через энергию потока на выходе ОТ выражением

$$E_{\text{ОТ}} = \sigma H + \frac{p_v}{\rho g} + Z_r,$$

где σ — коэффициент кавитации; H — напор; p_v — абсолютное давление насыщенного водяного пара при данной температуре воды; ρ — плотность РЖ; g — ускорение свободного падения; Z_r — опорный уровень.

Полная энергия на входе в СК

$$E_{\text{СК}} = E_{\text{ОТ}} + H. \quad (1)$$

В исследовании РОГТ низкого напора РО75 [11] реализован автоматизированный подбор конструктивных параметров СК, статора, НА и РК. Дальнейшая оптимизация лопастей РК [12] способствовала повышению КПД, изменению расхода РЖ в оптимальной точке и улучшению кавитационных характеристик. Для исследования использовано оптимизированное РК в комплексе с ОТ, спроектированной по заданному закону изменения площади поперечного сечения. В программном комплексе ANSYS CFX выполнена серия 3D-расчетов течения вязкой РЖ для параметров РОГТ низкого напора РО75

при шести положениях НА и шестнадцати значениях приведенной частоты вращения n_{11} , что позволило построить ее универсальную характеристику, показанную на рис. 5, где Q_{11} — расход вязкой РЖ; η — КПД.

Максимальный КПД η РОГТ низкого напора РО75 составил 92,8 % при оптимальном расходе вязкой РЖ $Q_{11} = 1015$ л/с. На рис. 5 показана универсальная характеристика проектируемой ГТ, а также рабочая зона РОГТ низкого напора РО75. Точка P соответствует работе РОГТ низкого напора РО75 в номинальном режиме (при номинальных значениях напора и мощности), точка C — при максимальном напоре, а точка A — при минимальном напоре.

Дополнительно выполнены расчеты трехмерного двухфазного (вода — пар) течения вязкой РЖ для анализа кавитационных характеристик РОГТ низкого напора РО75 [13]. Расчетная модель состояла из трех зон: НА (одна лопатка), РК (одна лопасть) и ОТ, спроектированной по предложенной методике.

Учет потерь напора в СК $h_{\text{СК}}$ и статоре позволил преобразовать уравнение (1) в выражение, описывающее энергетические параметры

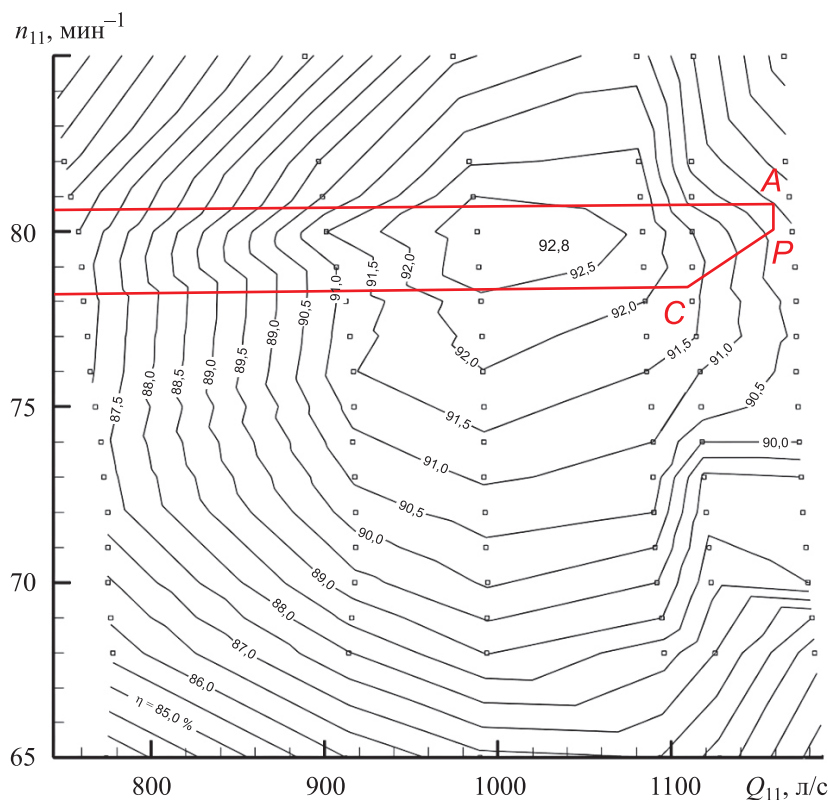


Рис. 5. Расчетная универсальная характеристика РОГТ низкого напора РО75

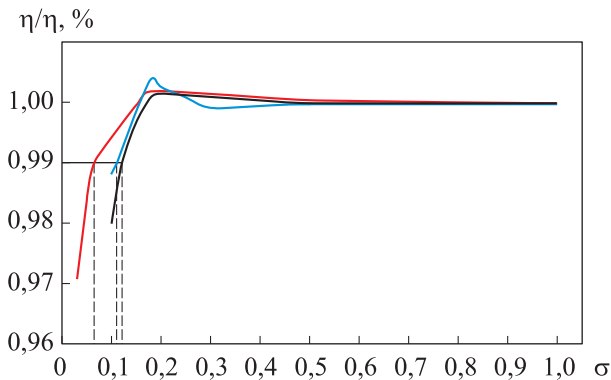


Рис. 6. Срывные характеристики РОГТ низкого напора РО75, работающей при номинальном режиме (—), минимальном (—) и максимальном (—) напорах

на входе в НА с учетом угла потока на выходе из СК:

$$E_{\text{НА}} = E_{\text{ОТ}} + H - h_{\text{СК}}. \quad (5)$$

Срывные характеристики при разных режимах работы РОГТ низкого напора РО75 приведены на рис. 6.

Критические коэффициенты кавитации σ определены по срывным характеристикам как значения, соответствующие снижению КПД на 1 %. Серия расчетов выполнена для трех рабочих режимов в диапазоне коэффициента кавитации $\sigma = 0,050 \dots 1,000$. По результатам расчета получены следующие критические значения: $\sigma = 0,115$ для номинального режима; $\sigma = 0,120$ при минимальном напоре и $\sigma = 0,065$ при максимальном напоре.

При проектировании РОГТ низкого напора основными задачами выступают достижение максимального полного КПД во всех рабочих режимах при сохранении необходимых антикавитационных характеристик. Особое значение имеет минимизация высоты ОТ, что существенно сокращает капитальные затраты на строительство [1].

Постановка задачи оптимизации. Ввиду взаимодействия ОТ и РК оптимизация ОТ проведена в расчетной области (рис. 7), включающей в себя РК и НА, так как целью оптимизации ОТ являлось повышение эффективности РОГТ в целом, а также улучшение ее кавитационных характеристик.

Целевыми функциями были максимум КПД в точке оптимума и минимум площади поперечного сечения на лопасти с давлением меньше такового для парообразования в расчетном

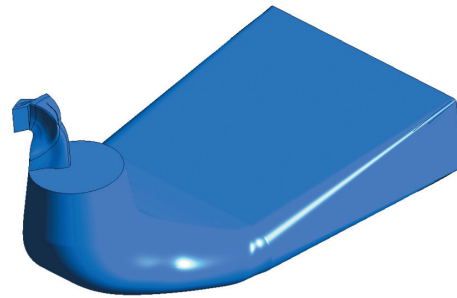


Рис. 7. Расчетная модель РОГТ низкого напора РО75

режиме: $S_p \rightarrow 0$. Площадь S_p представляет собой отношение площади $S_{\text{кав}}$, где выполнено условие возникновения кавитации (давление РЖ ниже, чем давление насыщенного пара), к площади лопасти РК. Этот параметр, определяемый по результатам численного расчета однофазного течения потока, можно использовать как упрощенный косвенный критерий кавитационных характеристик ГТ.

Накладывались три ограничения: в точке оптимума расход вязкой РЖ $Q_{\text{опт}} = (1000 \pm 5 \%)$ л/с; напор $H = (1 \pm 0,1 \%)$ м; КПД в расчетном режиме более 90 %.

Для верификации методики нахождения оптимальной точки проведены расчеты КПД и расхода вязкой РЖ при трех положениях НА ($a_0 = 26, 30$ и 32 мм) и номинальной частоте вращения $n_{11} = 78 \text{ мин}^{-1}$, где a_0 — открытие НА — расстояние между выходными кромками соседних лопаток.

Исследования проведены для приведенного диаметра $D_1 = 1$ м и напора $H = 1$ м. В каждом цикле оптимизации выполнены три расчета, позволившие получить значения расхода РЖ, КПД и площади S_p . Координаты оптимальной точки определены по параболической зависимости.

Методика оптимизации и ее верификация, предлагаемая в исследовании. Исследование представляет собой многоэтапную процедуру оптимизации по поверхности отклика. Алгоритм предполагает последовательное определение параметров оптимального решения на каждом этапе с помощью различных методов генерации поверхности отклика. Полученные параметры служат исходными данными для следующего этапа, причем диапазон их варьирования ограничен областью оптимального решения предыдущего этапа. Итерационный процесс продолжается до достижения сходимости.

сти решения, когда дальнейшее увеличение количества этапов становится нецелесообразным.

Верификация алгоритмов оптимизации выполнена с использованием тестовой задачи. Применена специальная математическая функция Розенброка, которая стала классическим эталоном для проверки качества работы алгоритма оптимизации [14] (рис. 8):

$$f(x_1, x_2) = 100(x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2,$$

где x_2, x_1 — переменные функции.

У функции есть известное аналитическое решение. Глобальный минимум функции находится в точке (1, 1), где значение функции равно нулю:

$$f(1, 1) = 0$$

На первом этапе определялась область поиска в пределах $x_i \in [-2, 048; 2, 048]$ с центром в точке ($x_1 = 0, x_2 = 0$) (рис. 9). Используя метод латинского гиперкуба (Latin Hypercube Sampling — LHS), генерировались 100 точек, на основе которых строились поверхности отклика разными методами: генетическим алгоритмом, кригингом, непараметрической регрессией и нейронными сетями. Для каждой полученной поверхности методом MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) находился глобальный минимум функции Розенброка. Из полученных результатов выбиралось наименьшее значение функции F .

Минимальное значение целевой функции после первого этапа было найдено в точке ($x_1 = 0,976; x_2 = 0,944$) и составило $F_1 = 0,0073$.

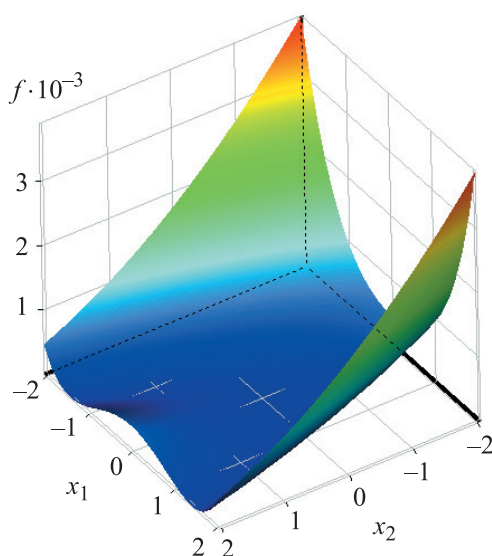


Рис. 8. График поверхности, описываемой функцией Розенброка

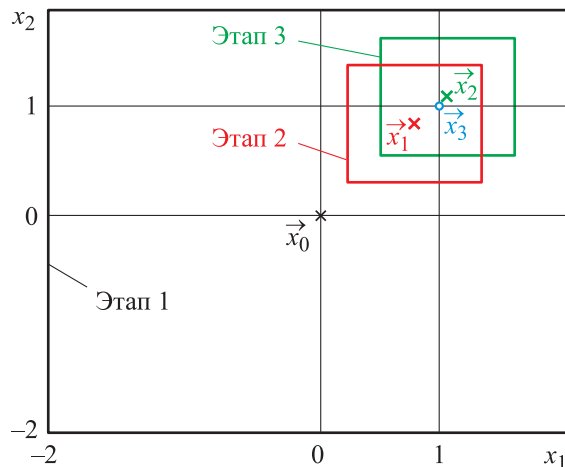


Рис. 9. Этапы определения минимума функции Розенброка

На втором этапе вокруг найденной оптимальной точки ($x_1 = 0,976; x_2 = 0,944$) формировалась новая область поиска, ограниченная диапазоном $\pm 10\%$ абсолютных значений x_1 и x_2 .

По аналогии с первым этапом: строилась поверхность отклика для суженной области; методом MOGA определялся глобальный минимум. Минимальное значение целевой функции после второго этапа найдено в точке ($x_1 = 1,00067; x_2 = 1,00144$) и составило $F_2 = -3,274 \cdot 10^{-5}$.

На третьем (окончательном) этапе в окрестности точки ($x_1 = 1,00067; x_2 = 1,00144$) снова формировалась новая область поиска, ограниченная диапазоном $\pm 10\%$ абсолютных значений x_1 и x_2 .

Минимальное значение целевой функции после третьего этапа было найдено в точке ($x_1 = 1,0001; x_2 = 1,001$) и составило $F_3 = 6,74 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, можно утверждать, что алгоритм оптимизационного поиска верифицирован с высокой степенью точности.

Графическое отображение алгоритма поиска решения функции Розенброка методами численной оптимизации приведено на рис. 9.

Алгоритм оптимизации проточной части РОГТ низкого напора РО75. Для получения оптимального решения, обеспечивающего максимальный КПД при расходе РЖ $Q = 1000$ л/с и одновременном улучшении кавитационных характеристик в расчетном режиме, применен многоэтапный метод анализа поверхности отклика, блок-схема алгоритма которого показана на рис. 10.

Для определения оптимального количества точек в матрице планирования эксперимента

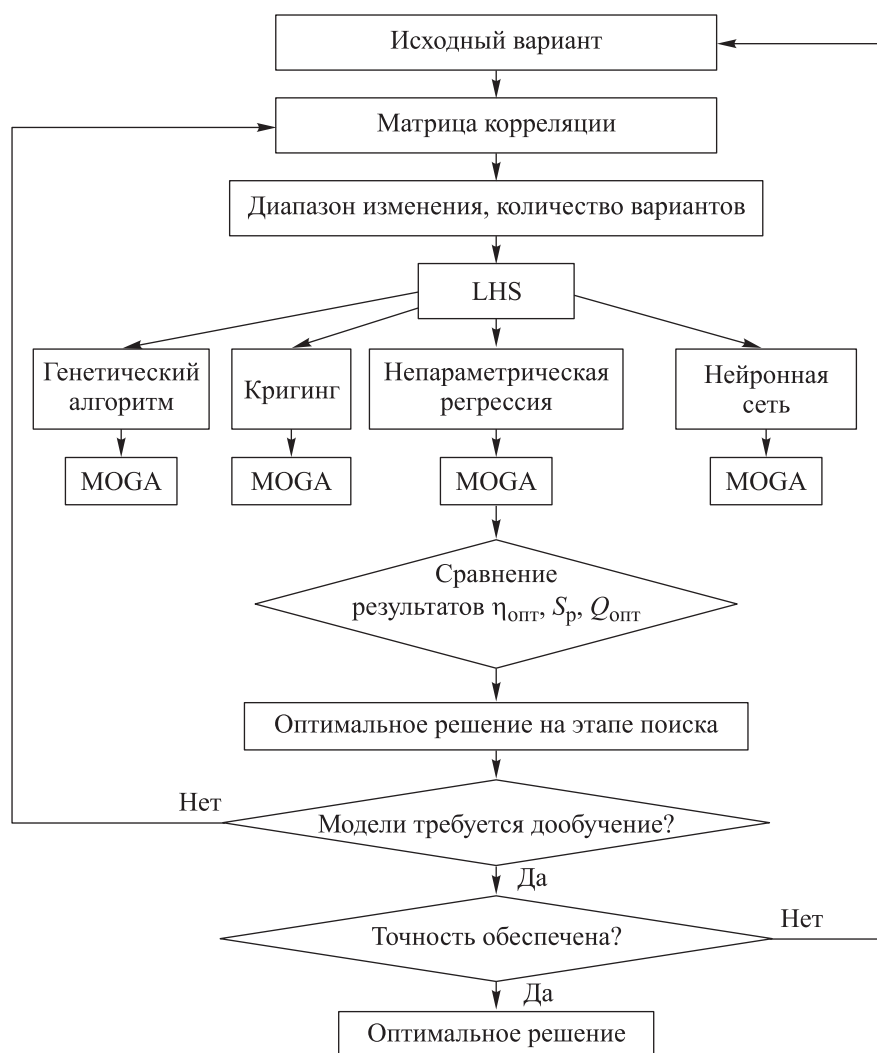


Рис. 10. Блок-схема алгоритма оптимизации

на каждом этапе строились поверхности отклика при разном количестве точек матрицы — вариантов конфигурации проточной части (25, 50, 100 и 200 точек) с применением четырех методов аппроксимации: генетического алгорит-

ма, кригинга, непараметрической регрессии и нейронных сетей. Анализ среднего отклонения между поверхностями отклика и результатами прямого гидродинамического расчета в среде ANSYS CFX показал, что при 100 точках погрешность КПД составляет 0,1 %, а погрешность расхода — 2 %. На основании результатов исследования установлено, что матрица из 100 точек (рис. 11) обеспечивает достаточную точность на всех этапах оптимизации.

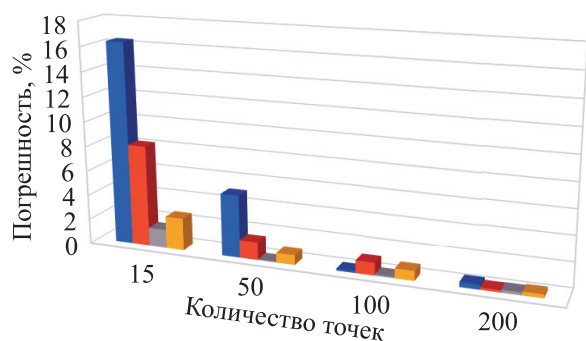


Рис. 11. Зависимость погрешности расчета от количества точек:

■ — генетический алгоритм; ■ — кригинг;
■ — непараметрическая регрессия; ■ — нейронные сети

Параметризация расчетной модели. В состав ОТ входили три основных элемента: входной конус (линейно расширяющийся диффузор), колено (разделенное на десять секций) и выходной диффузор с линейным изменением площадей поперечного сечения A_i . Исходная конфигурация ОТ характеризовалась законом изменения относительных площадей (рис. 12). В процессе оптимизации

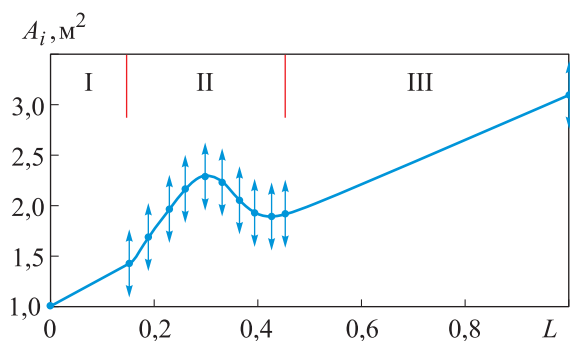


Рис. 12. Распределение площадей поперечных сечений A_i по длине ОТ L :

I — конус (диффузор за РК); II — колено;
III — выходной диффузор

варьировались четырнадцать параметров: площади одиннадцати сечений вдоль ОТ, высота конуса, высота колена и длина выходного диффузора. Для каждого варианта в MATLAB определялся полный набор параметров для построения 3D-модели, использованной в CFD-расчетах (ANSYS CFX).

Методика многоэтапной оптимизации. Методика оптимизации включала в себя следующие этапы (рис. 13):

1) формирование матрицы эксперимента (100 точек);

2) построение поверхностей отклика с использованием различных методов аппроксимации:

- генетического алгоритма;
- кригинга;
- непараметрической регрессии;
- нейронных сетей;

3) многокритериальная оптимизация (MOGA) для определения оптимальных решений;

4) выбор наилучшего решения для следующего этапа.

Получены следующие результаты: на первом этапе — увеличение КПД на 0,58 %; сохранение расхода РЖ в диапазоне $(1000 \pm 5 \text{ л/с})$; сокращение площади кавитации $S_{\text{кав}}$ на 3,19 %; на последующих этапах — дополнительный прирост КПД всего 0,09 % (суммарно 0,67 %) и дальнейшее уменьшение кавитации до 5,3 %.

Оптимизация была прекращена после четвертого этапа ввиду достижения сходимости результатов.

Окончательное решение отбиралось по фронту Парето, как показано на рис. 14, где $S_{\text{опт}}$ — площадь кавитации оптимального вари-

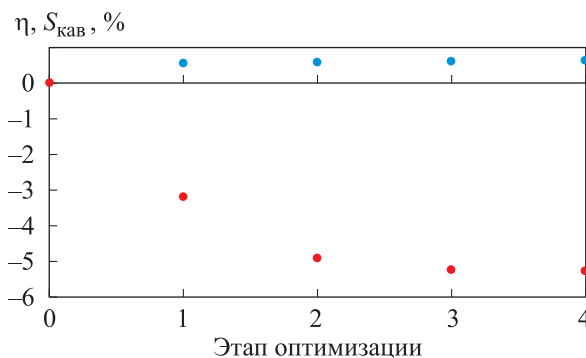


Рис. 13. Изменение КПД η (•) и площади кавитации $S_{\text{кав}}$ (•) на этапах оптимизации

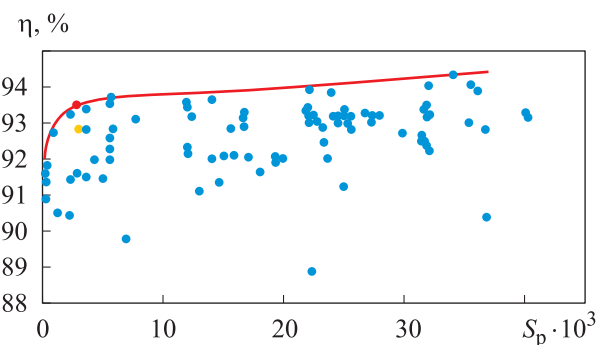


Рис. 14. Фронт Парето на последнем этапе оптимизации:

• — $S_{\text{опт}}$; • и • — оптимизированный и исходный варианты ОТ

анта конфигурации проточной части. Это позволило определить вариант с максимальным КПД при минимальной площади кавитации.

Результаты оптимизации геометрических параметров ОТ. В ходе оптимизации определены оптимальная конфигурация ОТ и наилучший закон изменения площадей поперечных сечений A_i по длине ОТ L (рис. 15).

Основные особенности оптимального решения:

• площади поперечных сечений нормированы относительно входного сечения (принятого за 1,0);

• выходная площадь увеличена на 8 % по сравнению с таковой исходного варианта ОТ;

• общая высота ОТ уменьшена на 5,7 %.

На рис. 15 показано распределение относительных площадей поперечных сечений A_i исходного и оптимизированного вариантов ОТ по его длине L . Нормировка выполнена относительно площади выходного сечения РК, которая оставалась неизменной на протяжении всех расчетов. Все изменения проведены относи-

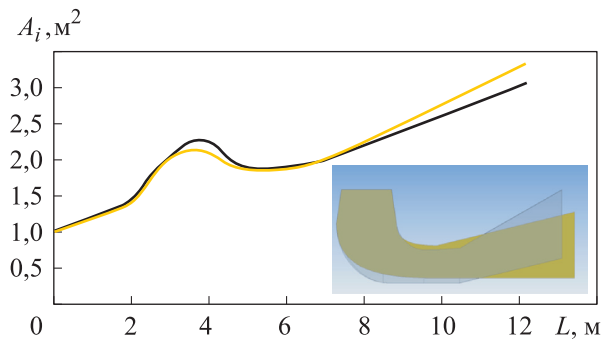


Рис. 15. Распределение площадей поперечных сечений A_i исходного (—) и оптимизированного (—) вариантов ОТ по длине L

тельно исходного варианта ОТ, принятого за базовый.

Основные преимущества полученного решения перед исходной конструкцией:

- улучшение гидродинамических характеристик;
- снижение габаритных размеров;
- оптимальное распределение сечений вдоль ОТ.

Верификация оптимального решения. Выполнен расчет трехмерного течения РЖ для

полной конфигурации РОГТ, включающей в себя СК, статор, НА, РК и ОТ. Моделирование проведено при восьми различных положениях НА в диапазоне частоты вращения $n_{11} = 65 \dots 85 \text{ мин}^{-1}$. Общее число расчетов составило около 120.

Универсальная характеристика РОГТ низкого напора РО75 с оптимизированной ОТ приведена на рис. 16. Анализ результатов показал, что оптимизированная конструкция достигает максимального значения КПД $\eta = 93,4 \%$ при расходе РЖ $Q_{11} = 995 \text{ л/с}$.

Оптимизация ОТ позволила достичь значительного улучшения энергетических и гидродинамических характеристик потока (рис. 17), что подтверждают следующие показатели:

- увеличение КПД турбины в режимах частичной нагрузки с 86,7 до 90,5 %;
- снижение потерь напора с 3,8 до 1,6 %;
- существенное выравнивание профиля потока;
- уменьшение зон отрыва и турбулентности;
- оптимизация распределения скоростей потока.

Основные результаты:

- увеличение КПД на 3,8 %;
- сокращение потерь напора в 2,4 раза;

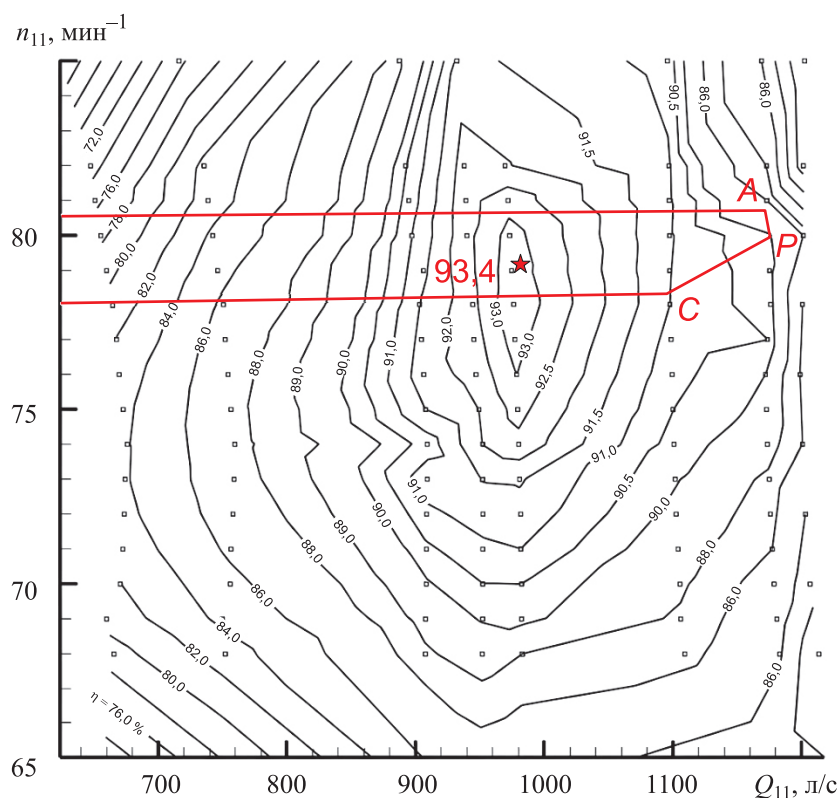


Рис. 16. Универсальная характеристика РОГТ низкого напора РО75 с оптимизированной ОТ

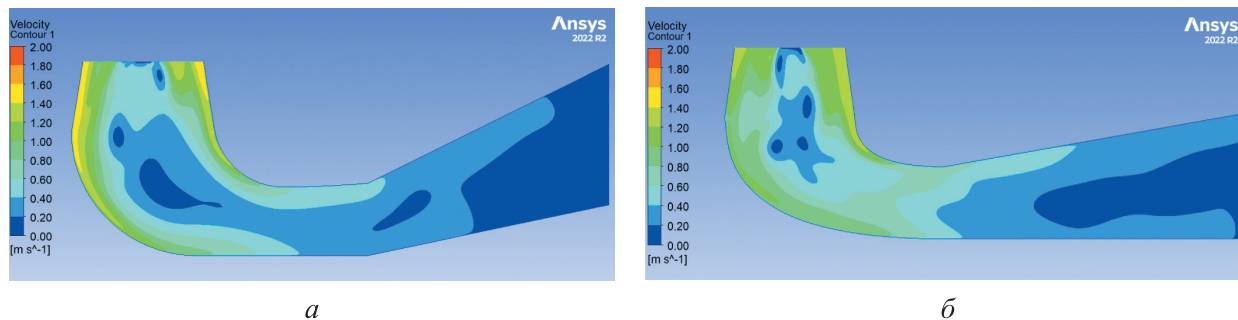


Рис. 17. Эпюры относительных скоростей потока в исходном (а) и оптимизированном (б) вариантах ОТ

- улучшение стабильности работы в режимах частичной нагрузки.

Все показатели рассчитаны на основе трехмерного моделирования течения потока, что подтверждает достоверность полученных результатов. Сравнительные профили потока до и после оптимизации наглядно демонстрируют улучшение гидродинамических характеристик (рис. 17).

Определение кавитационных характеристик.

В ходе исследования также найдены критические значения коэффициента кавитации $\sigma_{кр}$ (соответствующие снижению КПД на 1 % относительно номинала) для трех рабочих режимов. В номинальном режиме $\sigma_{кр} = 0,108$, при минимальном напоре $\sigma_{кр} = 0,110$, при максимальном напоре $\sigma_{кр} = 0,060$.

Полученные критические значения коэффициента кавитации позволяют точно определить границы безопасной эксплуатации ГТ при различных режимах работы.

Методика исследования: трехмерное моделирование двухфазного течения (вода — пар) потока; в расчетную область включены следующие элементы: НА, РК и оптимизированная ОТ.

По полученным результатам установлено следующее: наибольшая устойчивость к кавитационным явлениям достигается в режиме максимального напора; режим минимального напора наиболее подвержен кавитации; номи-

нальный режим демонстрирует промежуточные значения.

Выводы

1. Разработана методика оптимизационного проектирования ОТ для РОГТ низкого напора на примере модели РО75. В основу методики положены контролируемое изменение площади поперечного сечения по длине ОТ, автоматизированное построение конфигурации ОТ в среде MATLAB и итеративное моделирование формы колена для обеспечения плавности контура.

2. Применение параметризованного закона изменения поперечного сечения позволило оптимизировать количество варьируемых параметров, снизить вычислительные ресурсы, реализовать многоэтапную оптимизацию с использованием поверхностей отклика. Предварительно методика валидирована на тестовой функции Розенброка.

3. Благодаря оптимизации достигнуты следующие результаты:

- увеличение КПД на 0,7 % в номинальном режиме и до 2 % при частичных нагрузках;
- улучшение кавитационных показателей;
- уменьшение высоты конструкции на 5,7 %.

4. С точки зрения перспективы внедрения разработанный алгоритм позволяет повысить энергоэффективность ГТ, оптимизировать габаритные размеры турбинного оборудования и автоматизировать проектирование.

Литература

- [1] Soucek J., Nowak P. Optimization of elbow draft tubes for variable speed propeller turbine. *Water*, 2024, vol. 16, no. 10, art. 1457, doi: <https://doi.org/10.3390/w16101457>
- [2] Semenova A.V., Chirkov D.V., Skorospelov V.A. et al. Optimization design of the elbow draft tube of the hydraulic turbine. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022, vol. 1079, art. 012048, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1079/1/012028>
- [3] Mosonyi E. *Water power development*. Vol. 1. Low-head power plants. Akadémiai Kiadó, 1987. 880 p.

- [4] Kumar S., Cervantes M.J., Gandhi B.K. Flow field analysis of francis turbine draft tube using POD at design and part load operating conditions. *JAFM*, 2024, vol. 17, no. 4, pp. 770–784, doi: <https://doi.org/10.47176/jafm.17.4.2274>
- [5] Ковалев Н.Н. *Гидротурбины*. Ленинград, Машиностроение, 1971. 584 с.
- [6] Барлит В.В. *Гидравлические турбины*. Киев, Вища школа, 1977. 359 с.
- [7] Бусырев А.И., Топаж Г.И. *Выбор основных параметров и элементов проточной части реактивных гидротурбин*. Санкт-Петербург, Изд-во Политех. ун-та, 2007. 122 с.
- [8] Herland I. Design optimization of Francis turbine draft tube. *Proc. CRHT X*, 2020, vol. 5. URL: <https://ttl.ku.edu.np/wp-content/uploads/2020/08/CRHTX-05-Ingelin.pdf>
- [9] Скороспелов В.А., Турук П.А. Оптимизация поверхности тороидальной отсасывающей трубы гидротурбины. *Сибирский журнал индустриальной математики*, 2022, т. 25, № 1, с. 121–130, doi: <https://doi.org/10.33048/SIBJIM.2022.25.109>
- [10] Омран М., Жарковский А.А., Щур В.А. Выбор математической модели для расчета течения в проточной части радиально-осевой гидротурбины. *Современные технологии и экономика в энергетике. Мат. Межд. науч.-практ. конф.* Санкт-Петербург, Политех-Пресс, 2022, с. 207–209.
- [11] Жарковский А.А., Щур В.А., Омран М. и др. Автоматизация проектирования рабочих колес радиально-осевых гидротурбин. *Известия МГТУ МАМИ*, 2021, т. 15, № 4, с. 18–26.
- [12] Омран М., Жарковский А.А., Щур В.А. и др. Методика проектирования и оптимизации лопастной системы радиально-осевой гидротурбины. *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*, 2023, т. 7, № 1, с. 47–54, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-47-54>
- [13] Соколова М.А., Семенова А.В. Применение методики прогнозирования кавитационных характеристик при проектировании поворотно — лопастных гидротурбин. *Гидравлические машины, гидронепмоприводы и гидронепмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития*. Санкт-Петербург, 2018, doi: <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id18-35>
- [14] Lebede N., Diallo C. A comparative study of optimization techniques on the Rosenbrock function. *OJOp*, 2024, vol. 13, no. 3, pp. 51–63, doi: <https://doi.org/10.4236/ojop.2024.133004>

References

- [1] Soucek J., Nowak P. Optimization of elbow draft tubes for variable speed propeller turbine. *Water*, 2024, vol. 16, no. 10, art. 1457, doi: <https://doi.org/10.3390/w16101457>
- [2] Semenova A.V., Chirkov D.V., Skorospelov V.A. et al. Optimization design of the elbow draft tube of the hydraulic turbine. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022, vol. 1079, art. 012048, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1079/1/012028>
- [3] Mosonyi E. *Water power development*. Vol. 1. Low-head power plants. Akadémiai Kiadó, 1987. 880 p.
- [4] Kumar S., Cervantes M.J., Gandhi B.K. Flow field analysis of francis turbine draft tube using POD at design and part load operating conditions. *JAFM*, 2024, vol. 17, no. 4, pp. 770–784, doi: <https://doi.org/10.47176/jafm.17.4.2274>
- [5] Kovalev N.N. *Gidroturbiny* [Hydroturbines.]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 584 p. (In Russ.).
- [6] Barlit V.V. *Gidravlicheskie turbiny* [Hydraulic turbines]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1977. 359 p. (In Russ.).
- [7] Busyrev A.I., Topazh G.I. *Vybor osnovnykh parametrov i elementov protochnoy chasti reaktivnykh gidroturbin* [Selection of the main parameters and elements of the flow path of jet hydraulic turbines]. Sankt-Peterburg, Izd-vo Politekh. un-ta Publ., 2007. 122 p. (In Russ.).
- [8] Herland I. Design optimization of Francis turbine draft tube. *Proc. CRHT X*, 2020, vol. 5. URL: <https://ttl.ku.edu.np/wp-content/uploads/2020/08/CRHTX-05-Ingelin.pdf>
- [9] Skorospelov V.A., Turuk P.A. Optimization of the shape of a toroidal hydroturbine draft tube. *Sibirskiy zhurnal industrialnoy matematiki*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 121–130, doi: <https://doi.org/10.33048/SIBJIM.2022.25.109>

- <https://doi.org/10.33048/SIBJIM.2022.25.109> (in Russ.). (Eng. version: *J. Appl. Ind. Math.*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 148–155, doi: <https://doi.org/10.1134/S1990478922010148>)
- [10] Omran M., Zharkovskiy A.A., Shchur V.A. [Selection of a mathematical model for calculating the flow in the flow path of a radial-axial hydraulic turbine]. *Sovremennye tekhnologii i ekonomika v energetike. Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Modern technologies and economics in energy. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.]. Sankt-Peterburg, Politekh-Press Publ., 2022, s. 207–209. (In Russ.).
- [11] Zharkovskiy A.A., Shchur V.A., Omran M. et al. Automation of the design of impellers of francis turbines. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2021, vol. 15, no. 4, pp. 18–26. (In Russ.).
- [12] Omran M., Zharkovskiy A.A., Shchur V.A. et al. Technique for designing and optimization of the francis turbine blade system. *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoe i energeticheskoe mashinostroyeniye* [Omsk Scientific Bulletin. Ser. Aviation-Rocket and Power Engineering], 2023, vol. 7, no. 1, pp. 47–54, doi: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-47-54> (in Russ.).
- [13] Sokolova M.A., Semenova A.V. [The design of the kaplan turbine runner using the method of the cavitation characteristic prediction]. *Gidravlicheskie mashiny, gidropnevmoprivody i gidropnevmootomatika. Sovremennoe sostoyaniye i perspektivy razvitiya* [Hydraulic Machines, Hydraulic-Pneumatic Drives and Hydraulic-Pneumatic Automation. Current State and Development Prospects]. Sankt-Peterburg, 2018, doi: <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id18-35> (in Russ.).
- [14] Lebede N., Diallo C. A comparative study of optimization techniques on the Rosenbrock function. *OJOp*, 2024, vol. 13, no. 3, pp. 51–63, doi: <https://doi.org/10.4236/ojop.2024.133004>

Статья поступила в редакцию 20.07.2025

Информация об авторах

ОМРАН Мохаммад — инженер-исследователь отдела исследования и проектирования механизмов. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая ул., д. 29, e-mail: omran_m@spbstu.ru).

ЖАРКОВСКИЙ Александр Аркадьевич — доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы энергетического машиностроения. Институт энергетики. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая ул., д. 29, e-mail: azharkovsky@pef.spbstu.ru).

СВОБОДА Дмитрий Геннадьевич — кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы энергетического машиностроения. Институт энергетики. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, Российская Федерация, Политехническая ул., д. 29, e-mail: svoboda_dg@spbstu.ru).

Information about the authors

OMRAN MOHAMMAD — Research Engineer, Department of Mechanism Research and Design. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, Saint Petersburg, Russian Federation, Politechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: omran_m@spbstu.ru).

ZHARKOVSKII Aleksandr Arkadievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Higher School of Power Engineering. Institute of Energy. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, Saint Petersburg, Russian Federation, Politechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: azharkovsky@pef.spbstu.ru).

SVOBODA Dmitri Gennadevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Higher School of Power Engineering. Institute of Energy. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (195251, Saint Petersburg, Russian Federation, Politechnicheskaya St., Bldg. 29, e-mail: svoboda_dg@spbstu.ru).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Омран М., Жарковский А.А., Свобода Д.Г. Оптимизационное проектирование отсасывающей трубы низконапорной радиально-осевой гидротурбины. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 4, с. 95–107.

Please cite this article in English as:

Omran M., Zharkovskii A.A., Svoboda D.G. Optimization design of the draft tube for a low-head Francis turbine. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 4, pp. 95–107.