

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ЛОПАСТНОЙ СИСТЕМЫ РАДИАЛЬНО-ОСЕВОЙ ГИДРОТУРБИНЫ

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

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

Предложена методика проектирования и оптимизации лопастной системы радиально-осевой гидротурбины начиная с определения основных параметров всей проточной части. Также определяется диаметр рабочего колеса, необходимый для выработки номинальной мощности. Затем с помощью программы, реализующей квазитрехмерный подход, получается форма лопасти в первом приближении. Далее проводится серия расчетов трехмерного однофазного и двухфазного вязкого течения с целью определения КПД и кавитационных качеств гидротурбины при различных режимах работы. Критические значения коэффициента кавитации определены для трех режимов работы гидротурбины. С использованием многоцелевого генетического алгоритма (MOGA) по созданной поверхности отклика и суррогатной модели, ее описывающей, проведена оптимизация энергетических и кавитационных качеств гидротурбины на трех режимах ее работы. В результате оптимизации получено значительное повышение КПД гидротурбины, особенно при частичных нагрузках.

Ключевые слова: радиально-осевая гидротурбина, лопастная система, многоцелевой генетический алгоритм, математическая модель, кавитация.

Введение

Разрабатываемые и поставляемые на рынок гидротурбины (ГТ) должны обеспечивать высокие технико-экономические показатели, отвечать требованиям по надежности и долговечности. Это возможно только в случае существенного улучшения энергетических и кавитационных характеристик ГТ, прежде всего, на расчетных режимах работы. Проектирование лопастной системы ГТ должно быть направлено на достижение этих показателей.

В работе [1] разработанный комплекс программ позволяет спроектировать, рассчитать и спрогнозировать энергокавитационные характеристики радиально-осевой гидротурбины. В работе [2] аналитический расчет и численное моделирование были выполнены для проектирования лопасти рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины. Лопасть ГТ была разработана с использованием подхода *Bovet*, который позволяет рассчитать рабочее колесо, эффективность которого отличается от заявленного КПД на 1 %. В работе [3] базовая конструкция всех компонентов турбины Фрэнсиса производится на основе основных принципов гидродинамики турбомашин и базы данных опыта. Трехмерный однофазный CFD анализ проводится для всех элементов (рабочее колесо, спиральная камера, статор, направляющий аппарат, отсасывающая труба) турбины Фрэнсиса, рассчитываются и анализируются кавитационные параметры. В работе [4] описан прямой метод проектирования радиально-осевой ГТ начиная с расчета основных размеров рабочего колеса и до получения трехмерной (3D) модели лопасти рабочего колеса. В работе [5] была спроектирована высоконапорная радиально-осевая гидротурбина РО 500. Проектирование начинается с определения формы меридионального потока для

профилирования лопастной системы РК. На следующем шаге выполняется расчет обтекания решётки профилей с помощью САПР лопастных систем [9] для трёх линий тока. В завершение рассчитывается и строится прогнозная универсальная характеристика ГТ. Основная цель работы [6] заключается в том, чтобы спроектировать радиально-осевую гидротурбину с использованием известных методов проектирования, а затем использовать методы глобальной и локальной оптимизации. Рабочее колесо и отсасывающая труба в работе [6] спроектированы с использованием цикла глобальной оптимизации, управляемого генетическим алгоритмом.

Постановка задачи

Требовалось разработать методику проектирования радиально-осевой гидротурбины высокой быстроходности и провести ее апробацию на базе высоконапорной гидротурбины РО75, спроектированной на параметры: $H_p = 59,2$ м, $H_{\text{макс}} = 61,05$ м, $H_{\text{мин}} = 58,35$ м, $N_p = 30$ МВт. Методика должна производить выбор параметров и оптимизировать лопастную систему радиально-осевой гидротурбины (ЛС РО ГТ) с целью удовлетворения требований ТЗ. На рис. 1 представлена схема алгоритма проектирования.

Выбор основных параметров

Опираясь на универсальную характеристику по методу, изложенному в работе [7], для достижения мощности 30 МВт при расчетном напоре, получаем, что необходимый диаметр рабочего колеса 2,5 м и частота вращения 250 об/мин для натурной гидротурбины. Поправки КПД $\Delta\eta$ и частоты вращения Δn , определенные на основе учета чис-

Меридианный поток в проточной части и проектирование лопасти

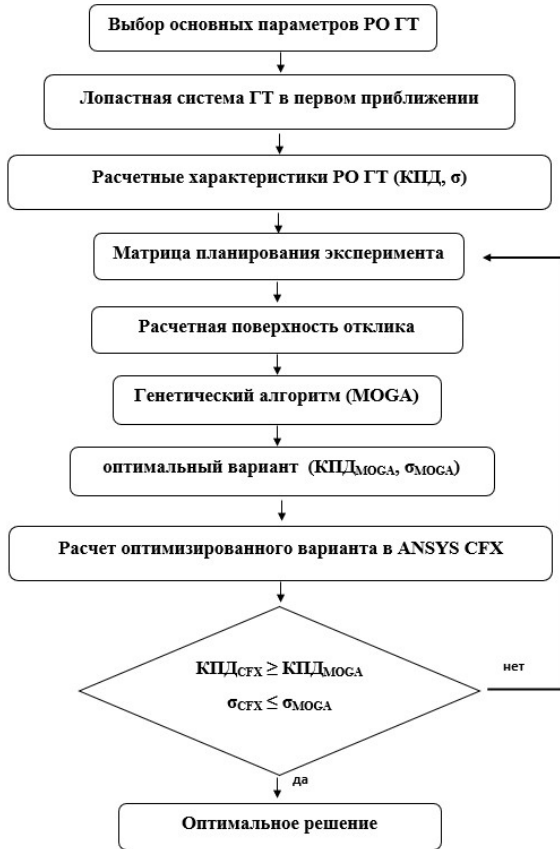


Рис. 1. Схема алгоритма проектирования РО ГТ
Fig. 1. Flowchart of the design algorithm Francis turbine

Для получения формы лопасти в первом приближении была использована система САПР ЛС ЦКТИ [9]. Сначала была определена форма проточной части. По определению формы проточной части имеется множество рекомендаций, по которым определяются его размеры в зависимости от коэффициента быстроходности или напора гидротурбины (А. И. Бусырев [7], Обретенов В. [10], Vovet [2] и т.д.).

На основании изложенного были определены форма и размеры проточной части, форма входной и выходной кромок лопасти в меридиональной проекции, количество лопастей, углы входа и выхода лопасти на трех линиях тока, угол охвата лопасти и распределение толщины лопасти. Максимальная толщина лопасти определялась на основании рекомендаций, представленных в [11]. По результатам расчета в программе САПР ЛС [9] были получены данные для построения трехмерной формы лопасти.

На следующем этапе были построены характеристики гидротурбины путем расчета трехмерного вязкого течения с использованием программы ANSYS CFX. Расчет трехмерного вязкого течения для проточной части включал спиральную камеру, статор, направляющий аппарат, рабочее колесо и отсасывающую трубу. Полная энергия потока на входе в спиральную камеру задавалась по формуле (1), полная энергия потока в выходном сечении отсасывающей трубы определялась по формуле (2)

$$E_{\text{ск}} = E_{\text{от}} + H; \quad (1)$$

$$E_{\text{от}} = \sigma H + \frac{P_v}{\rho g} - Z_r; \quad (2)$$

ла Рейнольдса, имели значение $\Delta\eta = 2,8\%$, $\Delta n = 1,19 \text{ мин}^{-1}$. Рассчитанная зона работы гидротурбины и ожидаемая эксплуатационная характеристика турбины показаны на рис. 2.

Расчет спиральной камеры проводился в соответствии с [7]. В результате расчетов было установлено, что угол потока на выходе из спирали составляет 29,7 град. [8]. Угол потока в районе статора 56,28 град. для 19 лопаток статора. Для 20 лопаток направляющего аппарата был выбран симметричный профиль. Отсасывающая труба бралась по отраслевому стандарту ОСТ 108.122.01-76.

где Z_r — опорный уровень, P_v — абсолютное давление насыщенного водяного пара при данной температуре воды, σ — коэффициент кавитации, H — напор.

Серия расчетов была проведена для построения энергетических характеристик спроектированной гидротурбины. Расчёты были выполнены для семи

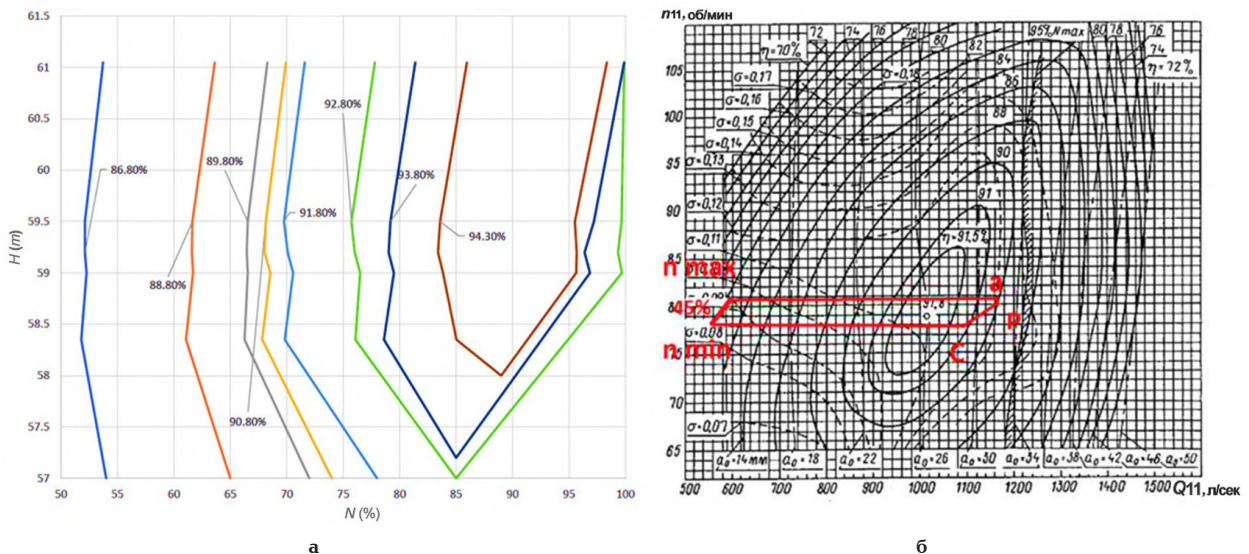


Рис. 2. Характеристики РО75: а — эксплуатационная характеристика; б — границы зоны работы ГТ
Fig. 2. Francis turbine PO75 characteristics: а — operational characteristic; б — boundaries of the operation zone

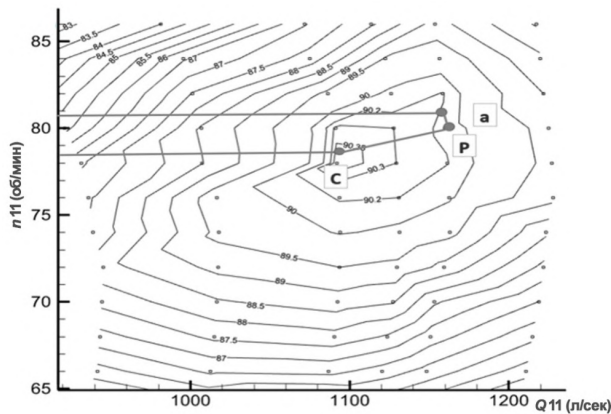


Рис. 3. Расчетная универсальная характеристика PO75
Fig. 3. Calculated universal characteristic of Francis turbine PO75

открытый направляющего аппарата при 10 значениях величины частоты вращения.

Из рис. 3 можно видеть, что максимальный КПД = 90,4 % получен при расходе $Q = 1100$ л/с. КПД гидротурбины в расчётной точке равен 90,1 % при приведенном расходе $Q_{11} = 1160$ л/с и приведенной частоте вращения $n_{11} = 80$ об/мин. Используя уравнения подобия, можно сосчитать, что турбина при натуральных размерах достигнет мощности 30,15 МВт. Анализируя полученный график, можно отметить значительное снижение КПД турбины при частичных нагрузках. Кавитационная характеристика спроектированной гидротурбины была найдена путем серии расчетов течения двухфазной жидкости — смеси жидкость-пар, с использованием различных значений коэффициента кавитации σ , выполнено 15 расчетов при изменении σ от 1 до 0,05. Установлено, что критический коэффициент кавитации для трех исследованных режимов работы P, A, C составил соответственно 0,178; 0,175; 0,135.

Оптимизационное проектирование лопастной системы гидротурбины

Из вышеизложенного следует, что разработанная лопастная система нуждается в оптимизации для достижения оптимальной конструкции, обеспечивающей высокий КПД турбины, особенно при частичных нагрузках. Также было обнаружено, что необходимо улучшить кавитационные характери-

стики, что будет способствовать стабильности и надежности работы турбины.

Параметризация лопасти и выбор целевых функционалов и ограничений

При параметризации лопастной системы использовались 23 параметра, описывающие меридиональное сечение проточной части (рис. 4), включая пять параметров на входной кромке, четыре параметра на выходной кромке, два параметра на периферии и втулке. Лопасть была построена в среде ANSYS DesignModeler с использованием пяти линий тока (сечений). Углы лопасти вдоль линий тока определялись с помощью 12 параметров.

Целевые функции:

- 1) максимум КПД, в точке оптимума

$$\eta_{\text{оп}} = \frac{M\omega}{\rho g Q H};$$

- 2) минимум относительной характерной площади A на лопасти, где давление меньше давления парообразования $P_{\text{кав}}$

$$S = \frac{A(p < p_{\text{кав}})}{A_{\text{лопасть}}}.$$

Ограничения:

- 1) по расходу в точке оптимума, согласно рекомендациям [12]:

$$Q_{\text{оп}} \rightarrow 1000 \text{ л/с};$$

- 2) по напору

$$H \approx 1 \text{ м};$$

- 3) по КПД при расчетном режиме

$$\eta_p \geq 90.$$

Для нахождения расхода и КПД турбины в оптимальной точке расчеты проводились при трех открытиях направляющего аппарата в каждом цикле оптимизации. По уравнению параболы определялись координаты оптимальной точки. С целью уменьшения расчетного времени выполнены трехмерные расчеты вязкого течения для трех доменов — направляющий аппарат, рабочее колесо и отсасыва-

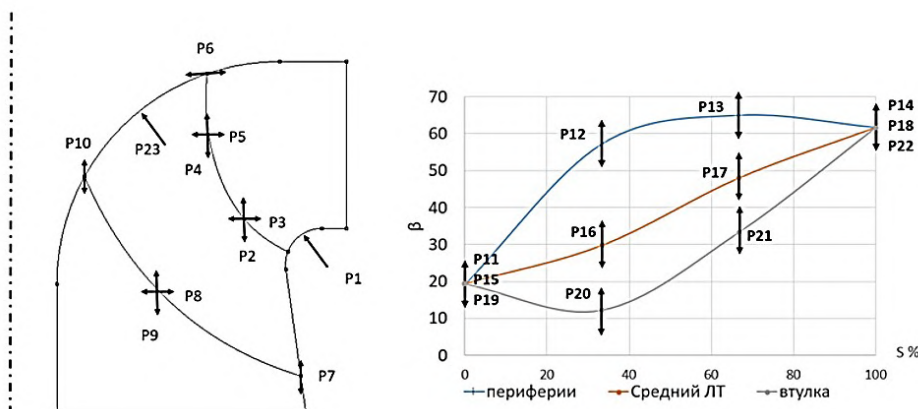


Рис. 4. Параметризация геометрии рабочего колеса
Fig. 4. Parameterization of the impeller geometry

ющая труба, с учетом потерь напора в спиральной камере и статоре.

Матрица планирования эксперимента

Растущая мощность компьютеров позволила методы, созданные для проектирования и анализа результатов моделирования, применять к широкому кругу задач. Такие методы охватывают набор подходов для создания суррогатной модели (также известной как мета-модель или аппроксимационная модель поверхности отклика) [13], которая используется для замены многократных затратных по времени вычислений с использованием ANSYS CFX [14]. Это важно при расчётах в гидротурбинах, которые требуют значительных ресурсов и большого количества времени. Метод латинского гиперкуба (LHS) стал особенно популярным среди стратегий для планирования эксперимента, который использовался в данной работе.

Для использования методов оптимизации в ANSYS CFX требуется ограниченное количество параметров, описывающих геометрию модели гидротурбины (менее 20), поэтому был проведен корреляционный анализ для определения наименее значимых параметров. В результате анализа корреляционной матрицы было обнаружено, что количество параметров можно уменьшить до 18. Было установлено, что параметры P5, P12, P16, P19, P21 (рис. 4) являются наименее значимыми.

Матрица планирования эксперимента (Design of experiments, DOE) была создана с помощью стратегии Латинского гиперкуба (LHS) [15]. Диапазон изменения параметров в матрице планирования эксперимента — 5 %, число элементов матрицы (вариантов проточной части) — 100.

Поверхность отклика

Для полученной матрицы планирования эксперимента DOE для описания поверхности отклика (Response Surface Optimization RSO) были использованы подходы генетической агрегации, Kriging, непараметрической регрессии и нейронной сети. Метод непараметрической регрессии дал лучший результат — погрешность для расхода не более 1,5 % и для КПД — не более 0,05 %.

Прямая оптимизация на основе полученной поверхности отклика

После получения математической модели для поверхности отклика для поиска оптимума был использован многоцелевой генетический алгоритм MOGA. Целевые функции — максимум КПД и минимум характерной площади кавитации, которая рассчитывалась в оптимальной точке. Ограничения по расходу $Q = 1000 \pm 2,5$ %, по напору $H = 1 \pm 0,5$ %. Общее количество изучаемых точек $1,8 \times 10^4$ (рис. 5). В результате многоцелевой оптимизации с использованием генетического алгоритма MOGA было установлено, что оптимальное решение находится в точке DP_356: $Q_{\text{оп}} = 1001 \text{ л/с}$, $\text{КПД}_{\text{оп}} = 91,8$ %, $S = 0,003$, $H = 1,001$ м.

Энергетические и кавитационные характеристики оптимального решения

Серия расчетов трехмерного вязкого течения была проведена для всех элементов проточной части, включая спиральную камеру, статор, направляющий аппарат, рабочее колесо (DP_356) и отсасывающую трубу. В результате расчетов была построена универсальная характеристика гидротурбины для 70 режимов работы (10 различных величин по частоте вращения для семи открытий направляющего аппарата) (рис. 6а).

Расчеты кавитационной характеристики были выполнены для трех режимов работы P, C, A, кавитационный коэффициент соответственно в этих точках составил 0,163; 0,05; 0,167 (рис. 6б).

Было выполнено сравнение между гидротурбиной с лопастной системой, полученной в результате оптимизации, и гидротурбиной с лопастной системой нулевого приближения при расчетном напоре (рис. 7). Получено значительное улучшение характеристики гидротурбины, особенно при частичных нагрузках. Натурная гидротурбина достигает мощности 30 МВт при $H_p = 59,2$ м.

Выводы

Представлена методика проектирования радиально-осевой гидротурбины типа PO75 начиная с выбора основных параметров и проведения рас-

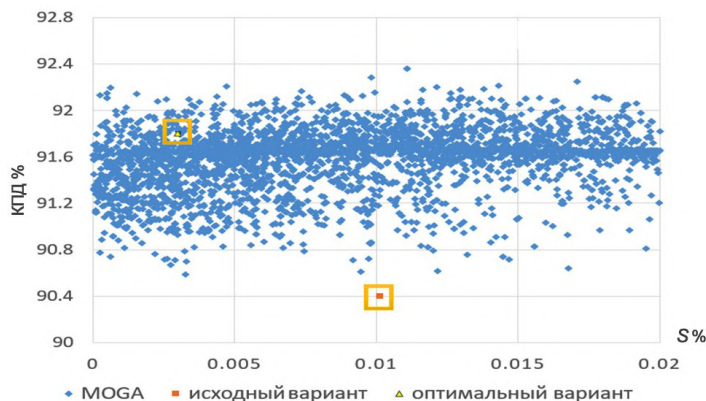


Рис. 5. Проекция фронта Парето на плоскость функционалов КПД и относительной площади S, где давление меньше давления парообразования

Fig. 5. The Pareto front of the efficiency and relative area functionals S, where the pressure is less than the vaporization pressure

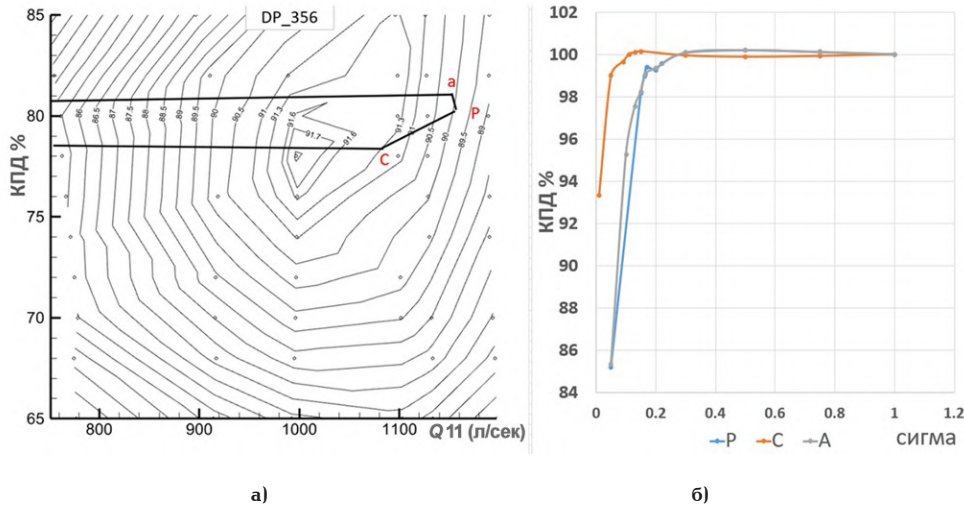


Рис. 6. Расчетные характеристики гидротурбины:
 а — универсальная характеристика; б — зависимость приведенного КПД от σ
Fig. 6. Calculated characteristics of the hydraulic turbine:
 а — universal characteristic; б — cavitation characteristics of hydraulic turbine

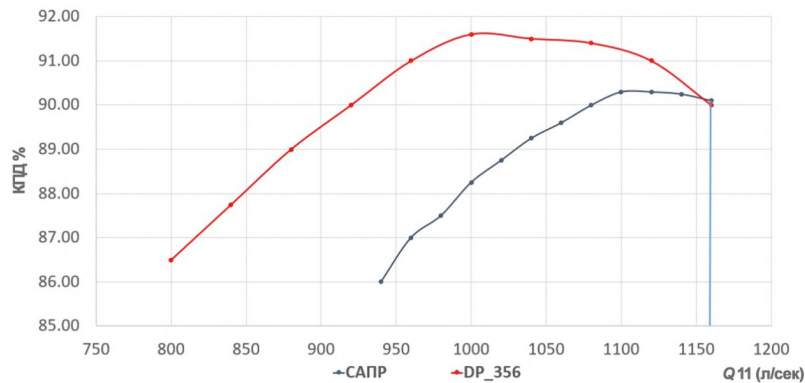


Рис. 7. КПД исходной и оптимизированной ГТ PO75 при расчетном напоре
Fig. 7. Efficiency of the original and optimized turbine PO75 at nominal head

четов элементов проточной части. С помощью квазитрехмерного подхода, реализованного в программе САПР ЛС [9], была получена форма лопасти в первом приближении и достигнут максимальный КПД гидротурбины 90,4 % при расходе 1100 л/с и кавитационном коэффициенте для трех исследованных режимов работы P, A, C соответственно 0,178; 0,175; 0,135.

В результате проведенной оптимизации лопастной системы было получено увеличение максимального КПД на 1,5 %. КПД для натурной гидротурбины составил 94,6 % при приведенном расходе $Q_{11} = 1001$ л/с. Увеличен КПД турбины при частичных нагрузках, пророст достигает 5 %. Улучшены кавитационные характеристики на режиме C ($\sigma = 0,05$) и, незначительно, на режимах P, A (0,163; 0,167). В дальнейшем оптимизация будет проведена для кавитационной характеристики в точке P и увеличен общий КПД турбины.

Список источников

1. Миронов К. А., Яковлева Л. К., Гулахмадов А. А. Совершенствование проточных частей радиально-осевых гидротур-

бин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування. 2014. № 1 (1044). С. 146–151.

2. Kocaka E., Karaaslana S., Yucela N. [et al.]. A numerical case study: Bovet approach to design a Francis turbine runner // Energy Procedia. 2017. Vol. 111. P. 885–894. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.251.

3. Patel K., Desai J. Development of Francis Turbine using Computational Fluid Dynamics // The 11th Asian International Conference on Fluid Machinery, India. 2011. DOI: 10.13140/2.1.2177.4402.

4. Biswakarma I. B., Shrestha R. Mathematical Modeling for the Design of Francis Runner // Proceedings of IOE Graduate Conference. 2017. № 5. 8 p.

5. Миронов К. А., Тынянова И. И., Гулахмадов А. А. Создание высокоэффективных проточных частей высоконапорных радиально-осевых гидротурбин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2012. № 50 (956). С. 127–133.

6. Flores E., Bornard L., Tomas L. Design of large Francis turbine using optimal methods // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2012. Vol. 15 (2). DOI: 10.1088/1755-1315/15/2/022023.

7. Топаж Г. И. Лопастные гидромашини и гидродинамические передачи. Основы рабочего процесса и расчета гидро-

турбин. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн ун-та, 2011. С. 109. ISBN 978-5-7422-2610-9.

8. Жарковский А., Щур В. А., Омран М., Стасеев А. А. Автоматизация проектирования рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины / Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 4 (5). С. 18–26. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-18-26.

9. Федоров А. В., Струментова Н. С., Шумилин С. А. Автоматизированное проектирование лопастных систем рабочих колес насос-турбин на напоры 90-150 м // Труды ЦКТИ. 1988. Вып. 244. С. 28–35.

10. Обретенков В. Ръководство за курсово проектиране на хидравлични турбомашини. София: ТУ – София, 1993. С. 169.

11. Барлит В. В. Гидравлические турбины. Киев: Вища школа, 1977. С. 176.

12. Nechleba M. Hydraulic Turbines. Their Design and Equipment / Trans. from Czech; ed. by C. Mayer, A.G. Evans. Prague, 1957. 631 p.

13. Felipe A. C. Viana. A Tutorial on Latin Hypercube Design of Experiments // Quality and Reliability Engineering. 2015. № 32 (5). P. 1975–1985. DOI: 10.1002/qre.1924.

14. Chen Z., Baek S. H., Cho H. [et al.]. Optimal design of J-groove shape on the suppression of unsteady flow in the Francis turbine draft tube // Journal of Mechanical Science and Technology. 2019. Vol. 33 (3). DOI: 10.1007/s12206-019-0423-x.

15. Ghimire A., Gautam S., Chitrakar S. [et al.]. Optimization of Francis Turbine Runner for Variable Speed Operations with minimization of sediment erosion // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1079. DOI: 10.1088/1755-1315/1079/1/012029.

ОМРАН Мохаммад, аспирант Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), г. Санкт-Петербург. SPIN-код: 5292-5533

AuthorID (РИНЦ): 1161680

ORCID: 0000-0001-9284-171X

ResearcherID: GZG-2431-2022

Адрес для переписки: omranmohmmd58@gmail.com

ЖАРКОВСКИЙ Александр Аркадьевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике 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

ЩУР Василий Алексеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике СПбПУ, г. Санкт-Петербург. SPIN-код: 3626-5109

AuthorID (РИНЦ): 1053584

ORCID: 0000-0002-9816-4323

Адрес для переписки: tshur_va@spbstu.ru

СВОБОДА Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент Высшей школы энергетического машиностроения Института энергетике СПбПУ, г. Санкт-Петербург. SPIN-код: 7818-6325

AuthorID (РИНЦ): 651622

AuthorID (SCOPUS): 57205464117

ORCID: 0000-0003-4671-0596

ResearcherID: AAI-8147-2020

Адрес для переписки: svoboda.dmitry@gmail.com

Для цитирования

Омран М., Жарковский А. А., Щур В. А., Свобода Д. Г. 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: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-47-54.

Статья поступила в редакцию 06.12.2022 г.

© М. Омран, А. А. Жарковский,

В. А. Щур, Д. Г. Свобода

TECHNIQUE FOR DESIGNING AND OPTIMIZATION OF THE FRANCIS TURBINE BLADE SYSTEM

M. Omran, A. A. Zharkovskiy, V. A. Schur, D. G. Svoboda

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Russia, Saint Petersburg, Politechnicheskaya str., 29, 195251

A technique for designing the blade systems of Francis turbine is proposed. Starting with the determination of the main parameters of the turbine components, where it is compatible with the operation of a hydraulic turbine at a given head. Also, the diameter of the impeller required to generate the nominal power. Then, using the realizing of the quasi-three-dimensional approach, the shape of the blade is obtained as a first approximation for a given blade, a series of calculations of three-dimensional single-phase and two-phase viscous flow is performed to determine the efficiency of the turbine at different operating modes, the cavitation properties of the turbine, respectively. The critical cavitation coefficient is determined for three operating points of hydraulic turbines. Using Multi-objective Genetic Algorithm (MOGA), the optimization of energy and cavitation properties is carried out for three operations points. The mathematical model is based on the Latin hypercube method. As a result of the optimization, a significant improvement in the efficiency of the hydraulic turbine has been obtained, especially at partial loads.

Keywords: Francis turbine, blade system, multi-objective genetic algorithm, mathematical model, cavitation.

References

1. Mironov K. A., Yakovleva L. K., Gulakhmadov A. A. Sovershenstvovaniye protochnykh chastey radial'no-osevykh gidroturbin [Improvement of flow parts of radial-axial hydraulic turbines] // Visnik NTU «KhPI». Seriya: Energetichni ta teplotekhnichni protsesi ta ustatkuvannya. *Bulletin of NTU «KhPI». Subject Issue: New Solutions in Modern Technology*. 2014. No. 1 (1044). P. 146–151. (In Russ.).
2. Kocaka E., Karaaslana S., Yucela N. [et al.]. A numerical case study: Bovet approach to design a Francis turbine runner // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 111. P. 885–894. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.251. (In Engl.).
3. Patel K., Desai J. Development of Francis Turbine using Computational Fluid Dynamics // The 11th Asian International Conference on Fluid Machinery, India. 2011. DOI: 10.13140/2.1.2177.4402. (In Engl.).
4. Biswakarma I. B., Shrestha R. Mathematical Modeling for the Design of Francis Runner // *Proceedings of IOE Graduate Conference*. 2017. No. 5. 8 p. (In Engl.).
5. Mironov K. A., Tynyanova I. I., Gulakhmadov A. A. Development of highly efficient flow parts for high-pressure radial-axis hydraulic turbines [Highly effective flow space creation of high-head Francis turbines] // Visnik NTU «KhPI». Seriya: Novi rishennya u suchasnikh tekhnologiyakh. *Bulletin of NTU «KhPI». Subject Issue: New Decisions of Modern Technologies*. 2012. No. 50 (956). P. 127–133. (In Russ.).
6. Flores E., Bornard L., Tomas L. Design of large Francis turbine using optimal methods // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2012. Vol. 15 (2). DOI: 10.1088/1755-1315/15/2/022023. (In Engl.).
7. Topazh G. I. Lopastnyye gidromashiny i gidrodinamicheskiye peredachi. Osnovy rabochego protsessa i rascheta gidroturbin [Vane hydraulic machines and hydrodynamic transmissions. Fundamentals of hydraulic turbine operation and calculation]. St. Petersburg, 2011. P. 109. ISBN 978-5-7422-2610-9. (In Russ.).
8. Zharkovskiy A., Shchur V. A., Omran M., Staseyev A. A. Avtomatizatsiya proyektirovaniya rabochego koleasa radial'no-osevoy gidroturbiny [Automation of the design of the impeller of a radial-axial hydraulic turbine] / *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No. 4 (50). P. 18–26. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-50-4-18-26. (In Russ.).
9. Fedorov A. V., Strumentova N. S., Shumilin S. A. Avtomatizirovannoye proyektirovaniye lopastnykh sistem rabochikh koleas nasos-turbin na napory 90-150 m [Automated design of pump-turbine impeller vane systems for 90-150 m head] // *Trudy TsKTI*. 1988. Issue. 244. P. 28–35. (In Russ.).
10. Obretenov V. R"kovodstvo za kursovo projektirane na khidravlichni turbomashini. Sofiya [Course design manual for hydraulic turbomachinery]. Sofia, 1993. P. 169. (In Bulg.).
11. Barlit V. V. Gidravlicheskiye turbiny [Hydraulic turbines]. Kiev, 1977. P. 176. (In Russ.).
12. Nechleba M. Hydraulic Turbines. Their Design and Equipment / *Trans. from Czech*; ed. by C. Mayer, A.G. Evans. Prague, 1957. 631 p. (In Engl.).
13. Felipe A. C. Viana. A Tutorial on Latin Hypercube Design of Experiments // *Quality and Reliability Engineering*. 2015. № 32 (5). P. 1975–1985. DOI: 10.1002/qre.1924. (In Engl.).
14. Chen Z., Baek S. H., Cho H. [et al.]. Optimal design of J-groove shape on the suppression of unsteady flow in the Francis turbine draft tube // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019. Vol. 33 (3). DOI: 10.1007/s12206-019-0423-x. (In Engl.).
15. Ghimire A., Gautam S., Chitrakar S. [et al.]. Optimization of Francis Turbine Runner for Variable Speed Operations with minimization of sediment erosion // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1079. DOI: 10.1088/1755-1315/1079/1/012029. (In Engl.).

OMRAN Mohammad, Graduate Student of Higher School of Power Engineering, Institute of Energy, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg.
SPIN-code: 5292-5533
AuthorID (RSCI): 1161680
ORCID: 0000-0001-9284-171X
ResearcherID: GZG-2431-2022
Correspondence address: omranmohmmd58@gmail.com



ZHARKOVSKIY Alexander Arkadyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Higher School of Power Engineering, Institute of Energy, SPbPU, 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

SCHUR Vasilii Alekseyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Higher School of Power Engineering, Institute of Energy, SPbPU, Saint Petersburg.

SPIN-code: 3626-5109

AuthorID (RSCI): 1053584

ORCID: 0000-0002-9816-4323

Correspondence address: tshur_va@spbstu.ru

SVOBODA Dmitry Gennadyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Higher

School of Power Engineering, Institute of Energy, SPbPU, Saint Petersburg.

SPIN-code: 7818-6325

AuthorID (RCSI): 651622

AuthorID (SCOPUS): 57205464117

ORCID: 0000-0003-4671-0596

ResearcherID: AAI-8147-2020

Correspondence address: svoboda.dmitry@gmail.com

For citations

Omran M., Zharkovskiy A. A., Schur V. A., Svoboda D. G. Technique for designing and optimization of the Francis turbine blade system // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 1. P. 47–54. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-47-54.

Received December 06, 2022.

© M. Omran, A. A. Zharkovskiy, V. A. Schur,

D. G. Svoboda