

Д. В. ЗЕЛЕНЦОВ
С. В. КРАШЕНИННИКОВ
О. В. САВЧЕНКО

ПРОФИЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ГИДРОТУРБИНЫ МИКРОГЭС КРИВЫМИ БЕЗЬЕ

PROFILING OF THE BLADE OF A HYDROTURBINE OF A MICRO HYDROELECTRIC POWER PLANT BY BEZIER CURVES

В системе водоснабжения зданий и сооружений в большинстве случаев давление воды избыточно. Это приводит к потере затраченной на создание давления воды энергии и вызывает перерасход энергоресурсов. Один из способов утилизации теряемой энергии состоит в применении в системах водоснабжения микроГЭС. В то же время отсутствует подробная методика проектирования таких устройств, что является препятствием к их разработке и массовому внедрению. В частности, отсутствует методика проектирования основного узла микроГЭС – гидротурбины, которая во многом определяет эффективность работы устройства. В работе показан один из способов профилирования рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины микроГЭС при помощи кривых Безье для достижения наибольшего КПД устройства.

Ключевые слова: система водоснабжения, микроГЭС, гидротурбина, рабочее колесо, лопатка, кривая Безье, профилирование, цилиндрические координаты, модель

В настоящее время одним из перспективных направлений энергосбережения является получение электрической энергии путем использования избыточного магистрального давления при транспортировании по трубопроводам жидких рабочих и технологических сред. В частности, одним из вариантов утилизации энергии давления может быть применение микроГЭС в системе водоснабжения отдельно расположенных зданий и сооруже-

In the water supply system of buildings and structures, in most cases, water pressure is excessive. This leads to the loss of energy spent on creating water pressure and causes an overexpenditure of energy resources. One of the ways to utilize the lost energy is to use it in the water supply systems of micro hydroelectric power plants. At the same time, there is no detailed methodology for designing such devices, which is an obstacle to their development and mass implementation. In particular, there is no methodology for designing the main unit of a microhydroelectric power station – a hydroturbine, which largely determines the efficiency of the device. The paper shows one of the methods for profiling the impeller of a radial-axial hydraulic turbine of a microhydroelectric power station using Bezier curves to achieve the highest efficiency of the device.

Keywords: water supply system, micro HPP, hydro turbine, impeller, blade, Bezier curve, profiling, cylindrical coordinates, model

ний. Вырабатываемая микроГЭС электроэнергия передается непосредственно потребителю или аккумулируется. Режим работы таких устройств обычно характеризуется расходами воды в диапазоне 1–10 дм³/с при перепаде давления в 100–200 кПа. Обзор литературы по данному вопросу показывает, что такие режимы работы не характерны для существующих гидротурбин. Поэтому детально проработанные конструкции микроГЭС отсутствуют,

а также вопросы расчета таких устройств недостаточно изучены [1, 2].

В данной статье приводится возможный вариант профилирования рабочего колеса (РК) радиально-осевой гидротурбины как основного узла микроГЭС на конкретном численном примере.

КПД гидротурбины обеспечивается на этапе профилирования ее РК, так как зависит от потерь в проточной части. Уровень потерь определяется гидродинамическим совершенством межлопаточного канала. Задача проектирования заключается в том, чтобы найти такую форму лопаток, которая обеспечивает требуемый поворот потока с минимальными потерями при сохранении приемлемой прочности и технологичности изготовления.

Процесс профилирования РК выполняется в три этапа:

- 1) построение меридионального обвода проточной части;
- 2) построение средних линий профилей в контрольных сечениях;
- 3) построение профилей лопаток в контрольных сечениях.

Профилирование лопаток РК проведено в цилиндрической системе координат, центр которой находится на оси вращения, осевое направление совпадает с осью вращения РК, а радиальная ось проходит через точку на внутреннем обводе проточной части с максимальным значением радиуса.

На первом этапе проектирования РК формируются меридиональные обводы проточной части – обводы в плоскости, проходящей через ось вращения ротора. Меридиональное сечение состоит из внутреннего (втулка) и внешнего (корпус) обводов, ограничивающих лопатку со стороны диска и сверху, а также промежуточных сечений. Обводы меридионального сечения должны быть плавными, без резкого изменения кривизны. Радиусы кривизны должны быть максимальными, а на границах обводов (входе и выходе РК) – стремиться к бесконечности.

Для построения элементов РК использованы кривые Безье [3]. Имеется опыт использования кривых Безье для газовых турбин [4–6], для гидравлических турбин данный подход также представляет интерес в части обеспечения безотрывного течения рабочего тела. У кривой Безье кривизна меняется плавно и непрерывно на всем протяжении. Кривая Безье строится на основе опорных точек. Для профилирования элементов проточной части использованы кривые с тремя опорными точками. Двумя из них являются концы кривой, третья определена с использованием входного и выходного углов профилей меридионального сечения (рис. 1).

Исходными данными для построения меридионального профиля являются: расход воды в микроГЭС $Q = 5 \text{ дм}^3/\text{с}$, меридиональная составляющая скорости $C_M = 0,04 \text{ м/с}$, наружный диаметр РК на входе $D_1 = 0,1 \text{ м}$, втулочный (внутренний), средний и наружный диаметры на выходе из РК $D_{2вт}$, $D_{2сп}$, $D_{2к}$, его ширина $B = 0,025 \text{ м}$ и высота лопатки на входе $b_1 = 0,004 \text{ м}$, а также углы θ_{11} касательных к обводам меридионального сечения.

Предварительно определяются величины внутреннего и внешнего диаметров на выходе из РК.

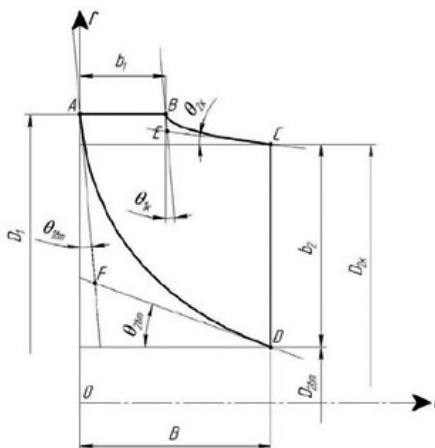


Рис. 1. Построение меридиональных обводов с помощью кривых Безье с тремя опорными точками

Выходная площадь, нормальная средней линии потока (при условии $C_M = const$):

$$F_2 = \frac{Q}{C_M}$$

Угол выхода $\theta_{2сп}$ принят равным $12,5^\circ$. Тогда наружный диаметр на выходе РК:

$$D_{2к} = \frac{\sqrt{\frac{F_2 \cdot 4}{\pi} + D_{2сп}^2}}{\cos \theta_{2сп}}$$

Внутренний диаметр на выходе РК:

$$D_{2вт} = \frac{\sqrt{D_{2сп}^2 - \frac{F_2 \cdot 4}{\pi}}}{\cos \theta_{2сп}}$$

Величины углов θ_i на входе РК приняты $\theta_{1вт} = 1^\circ$, $\theta_{1к} = 2^\circ$, величина угла у втулки РК $\theta_{2вт} = 15^\circ$, внешний угол образующей меридионального сечения $\theta_{2к} = 10^\circ$.

Для получения координат дополнительной, третьей опорной точки кривой Безье использованы следующие соотношения, полученные совместным решением уравнений прямых AF, FD и прямых BE, EC (см. рис. 1).

Значение осевой координаты для опорных точек меридиональных сечений корпуса над лопатками, втулки РК, и промежуточных сечений лопатки по высоте проточной части:

$$a_i = \frac{a_{1i} \cdot tg(\theta_{2i}) + r_{2i}}{tg(\theta_{2i}) - ctg(\theta_{1i})}$$

Соответствующие радиальные координаты этих точек:

$$r_i = r_{1i} - a_i \cdot ctg(\theta_{1i})$$

Здесь индекс i относится к кривым внутреннего обвода «вт» или внешнего «к».

Когда получены радиальные r_i и осевые a_i координаты всех трех опорных точек внешнего и внутреннего обводов, можно записать уравнения кривых Безье.

Уравнение горизонтальной координаты кривой Безье для меридиональных профилей турбины [3]:

$$a_{ij} = (1 - x_j)^2 a_{1i} + 2x_j(1 - x_j)a_i + x_j^2 a_{2i}$$

Уравнение радиальной координаты кривой Безье для меридиональных профилей турбины [3]:

$$r_{ij} = (1 - x_j)^2 r_{1i} + 2x_j(1 - x_j)r_i + x_j^2 r_{2i}$$

Здесь индекс j относится к осевой координате профиля.

В этих уравнениях переменная задается с некоторым шагом в интервале 0...1.

Необходимость профилирования входного участка лопастей связана с требованием безударного входа рабочего тела в межлопаточный канал. Обеспечение безударного входа позволяет снизить потери в отрывных течениях в межлопаточном канале.

Для обеспечения безударного входа следует соблюдать соотношение [7]:

$$\frac{U_1}{\sin(\beta_1 - \alpha_1)} = \frac{C_1}{\sin(\beta_1)}$$

Здесь U_1 – скорость переносного движения на входе турбины; C_1 – абсолютная скорость на входе турбины; α_1 – угол входа потока перед РК; β_1 – угол входа лопатки РК турбины.

Для обеспечения безударного входа на максимальных режимах выбран угол входа лопаток турбины $\beta_1 = 60^\circ$.

На рис. 2 приводится результат профилирования РК в меридиональном сечении. Здесь показано положение внутреннего обвода, внешнего обвода (корпус РК) и положение среднего сечения потока.

Вторым этапом профилирования рабочих лопаток радиально-осевой турбины является определение формы их средних линий в контрольных сечениях.

Средняя линия лопатки турбины задается в виде набора точек в цилиндрической системе координат (a, r, φ) . Меридиональная проекция средних линий была построена на рис. 2, и координаты a, r точек, лежащих на контрольных сечениях, уже известны. То есть задача построения средней линии в любом сечении сводится к отысканию ее угловой координаты.

Для нахождения угловой координаты φ построена проекция средней линии на окружное направление (рис. 3). Ее протяженность равна шагу между лопатками в контрольном сечении D_{2cp} , а осевое расстояние равно ширине рабочего колеса B .

Для определения числа лопаток z в РК использована зависимость [2]:

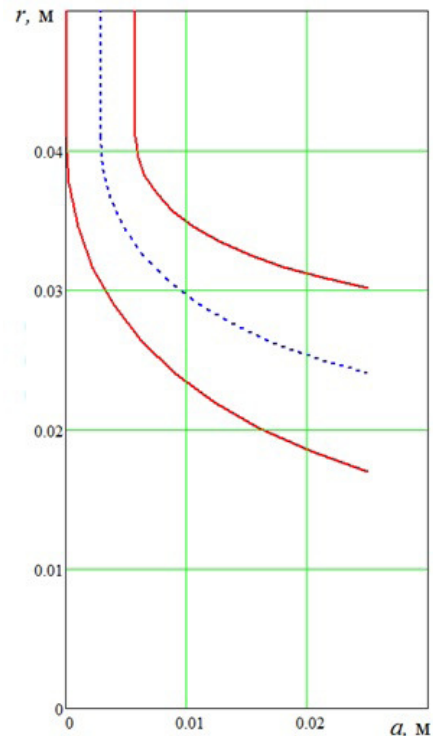


Рис. 2. Результат профилирования меридионального сечения проточной части РК

$$z = 6,5 \frac{D_1 + D_{2\text{cp}}}{D_1 - D_{2\text{cp}}} \sin\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right) \cdot k_{\text{min}}.$$

Здесь $k_{\text{min}} = 0,9$ – коэффициент, учитывающий увеличенную относительную толщину лопаток микротурбины; β_2 – угол выхода лопатки РК турбины.

Из приведенной зависимости имеем параметр $z = 9$.

По среднему выходному диаметру определяем шаг лопаток:

$$t = \frac{\pi \cdot D_{2\text{cp}}}{z}.$$

Для обеспечения высокого гидродинамического качества лопатки окружная проекция средней линии также строится с помощью кривой Безье.

Как и при построении меридиональных обводов РК для формирования кривой Безье использовались три опорные точки (см. рис. 3): точка начала кривой К, лежащая на осевой линии, точка N и точка M пересечения осевой линии и прямой, проведенной через точку N под углом β_2 от окружной координаты u . Алгоритм построения кривой аналогичен приведенному выше. Положение средней линии профиля лопатки РК в u - r координатах приведено на рис. 4. Здесь u – окружная координата, в пределе равная шагу между лопатками в контрольном сечении $D_{2\text{cp}}$, r – координата радиуса турбины.

При помощи полученной кривой рассчитывается угловая координата средней линии лопатки. Определяются текущие значения координат u , которые, опираясь на значение радиуса контрольного сечения $r_{2\text{cp}}$, пересчитываются в значение угловой координаты:

$$\varphi_k = \frac{180 \cdot u_k}{\pi \cdot r_{\text{cp}}}, \text{ град.}$$

Аналогично рассчитываются координаты точек, лежащих на внутреннем и внешнем обводах РК в контрольных сечениях.

На третьем этапе профилирования вычисляются габариты лопастей, определяющих положение спинки и корытца лопатки в контрольных сечениях. Из соображений прочности максимальная толщина лопатки турбины принимается равной $\delta_{\text{max}} = 3$ мм. Размеры кромок лопаток на входе $d_{\text{вх}} = 1,3$ мм, на выходе – $d_{\text{вых}} = 0,5$ мм при линейном изменении толщины лопатки от максимального значения.

По результатам профилирования строится объемная модель РК. Данная модель может быть использована для изображения течения в радиально-осевой турбине микроГЭС.

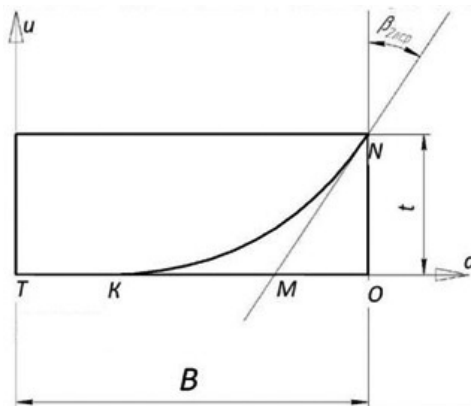


Рис. 3. Построение средних линий профиля лопастей в контрольном сечении

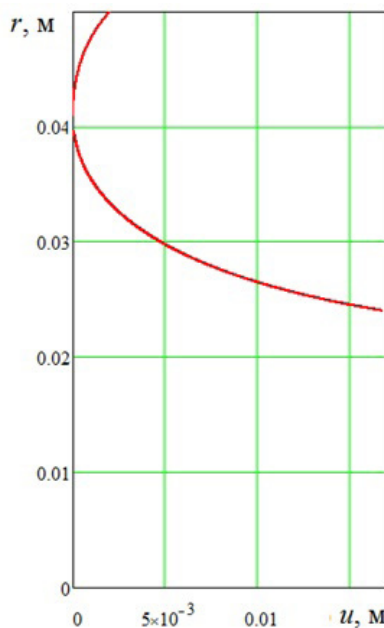


Рис. 4. Положение средней линии профиля лопатки РК в u - r координатах (вид со стороны входа в турбину)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центробежной турбины на стационарных и переходных режимах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974. 227 с.
2. Топаж Г.И. Лопастные гидромашинные и гидродинамические передачи. Основы рабочего процесса и расчета гидротурбин: СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 154 с.
3. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.
4. Виноградов Л.В. Профилирование лопаток турбин кривыми Безье // Инженерные системы – 2015:

труды VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 20–22 апреля 2015 / под общ. ред. Н.К. Пономарева. 2015. С. 564–571.

5. *Виноградов Л.В., Алексеев А.П., Костюков А.В.* Профиль лопатки турбины из Bezier // Вестник РУДН, Серия «Инженерные исследования». 2013. №3. С.10–16.

6. *Батулин О. В.* Профилирование рабочих колес радиально-осевых турбин с помощью кривых Безье // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, Серия «Авиационная и ракетно-космическая техника». 2011. №3(27). С.125–130.

7. *Степанов Н.Н.* Гидравлические машины. Киев: Высшая школа, 1978. 152 с.

REFERENCES

1. Mitrohin V.T. *Vybor parametrov i raschet centrostremitel'noj turbiny na stacionarnykh i perehodnykh rezhimakh. 2-e izd., pererab. i dop.* [Selection of parameters and calculation of centripetal turbine in stationary and transient modes. 2nd ed., Rev. and add]. Moscow, Mechanical Engineering, 1974. 227 p.

2. Topazh G.I. *Lopastnye gidromashiny i gidrodinamicheskieperedachi. Osnovy rabochego processa*

i rascheta gidroturbin [Blade hydraulic machines and hydrodynamic transmissions. Basics of the working process and calculation of hydraulic turbines]. St. Petersburg, Polytechnic University Press, 2011. 154 p.

3. Rodzhers D., Adams Dzh. *Matematicheskie osnovy mashinnoj grafiki* [Mathematical fundamentals of machine graphics]. Moscow, Mir, 2001. 604 p.

4. Vinogradov L.V. Profiling of turbine blades with Bezier curves. *Inzhenernye sistemy – 2015: trudy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Engineering Systems – 2015: proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2015, pp. 564–571. (In Russian)

5. Vinogradov L.V., Alekseev A.P., Kostyukov A.V. Profile of the turbine blade from Bezier. *Vestnik RUDN, Seriya «Inzhenernye issledovaniya»* [RUDN Bulletin, Engineering Research Series], 2013, no. 3, pp. 10–16. (in Russian)

6. Baturin O.V. Profiling of impellers of radial-axial turbines using Bezier curves. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo azerokosmicheskogo universiteta, Seriya «Aviacionnaja i raketno-kosmicheskaja tehnika»* [Bulletin of Samara State Aerospace University, Series “Aviation and Rocket and Space Technology”], 2011. no. 3(27), pp. 125–130. (in Russian)

7. Stepanov N.N. *Gidravlicheskie mashiny* [Hydraulic machines]. Kyiv, Higher School, 1978. 152 p.

Об авторах:

ЗЕЛЕНЦОВ Данила Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой теплогазоснабжения
и вентиляции

Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: tgv@samgtu.ru

ZELENTSOV Danila V.

PhD of Engineering Science, Associate Professor, Head
of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: tgv@samgtu.ru

КРАШЕНИННИКОВ Сергей Всеволодович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: tgv@samgtu.ru

KRASHENINNIKOV Sergey V.

PhD of Engineering Science, Associate Professor, Head
of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: tgv@samgtu.ru

САВЧЕНКО Олег Владимирович

инженер-конструктор 1-й категории
ПАО «ОДК-Кузнецов»
443009, Россия, г. Самара, Заводское шоссе, 29
E-mail: olegsav4nko@yandex.ru

SAVCHENKO Oleg V.

Design Engineer of the 1st Category
PAO «ODK-Kuznetsov»
443009, Russia, Samara, Zavodskoe str., 29
E-mail: olegsav4nko@yandex.ru

Для цитирования: *Зеленцов Д.В., Крашенинников С.В., Савченко О.В.* Профилирование рабочего колеса гидротурбины микроГЭС кривыми Безье // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 2. С. 17–21. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.02.3.

For citation: *Zelentsov D.V., Krasheninnikov S.V., Savchenko O.V.* Profiling of the Blade of a Hydroturbine of a Micro Hydroelectricpower Plant by Bezier Curves. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 2, pp. 17–21. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.02.3.