Ilmiy tadqiqotlar va ularning yechimlari jurnali
Aoka guvohnoma № 323759 ISSN: 3060-4818

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО КОЛЕСА СВОБОДНОТОЧНОЙ МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ ИРРИГАЦИОННЫХ КАНАЛОВ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Убайдуллаев Ж.С. (Факультет: Гироэнергетика. Группа MY 24-30)
Научный руководитель / Scientific supervisor: Кан Э.К. (Доцент / Associate Professor)

Национальный исследовательский университет
«ташкентский институт инженеров ирригации
И механизации сельского хозяйства» (тиими)

doi.org/10.5281/zenodo.20522748

Аннотация. В статье представлены результаты теоретического и численного исследования по оптимизации геометрических параметров рабочего колеса лопастного типа свободноточной микрогидроэлектростанции (микроГЭС) применительно к условиям равнинных ирригационных каналов Республики Узбекистан. Методом элементов лопасти и количества движения (BEM) выполнено параметрическое исследование влияния угла установки лопасти (β = 20°–90°), числа лопастей (z = 4–20) и профиля поперечного сечения на коэффициент мощности C_p и КПД установки. Установлено, что оптимальная комбинация параметров (β = 38°, z = 14, профиль NACA 4412) обеспечивает коэффициент мощности C_p = 0,462 и полный КПД η = 39,5%, что на 17,0 процентных пункта (+75,6%) превышает показатели базовой конструкции с плоскими радиальными лопастями. Результаты верифицированы независимыми экспериментальными данными. Предложенные решения не требуют применения специальных материалов и обеспечивают полную локализацию производства на предприятиях Узбекистана.

Ключевые слова: свободноточная микроГЭС, рабочее колесо лопастного типа, BEM-моделирование, NACA 4412, ирригационные каналы, возобновляемые источники энергии, Узбекистан.

IMPROVEMENT OF THE IMPELLER OF THE FREE-FLOW MICRO HYDROELECTRIC POWER PLANT FOR IRRIGATION CANALS OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

Abstract. This paper presents the results of a theoretical and numerical study on the optimization of geometric parameters of a paddle-type impeller for a free-flow micro hydroelectric power plant (micro HPP) applied to the conditions of lowland irrigation canals of the Republic of Uzbekistan. Using the Blade Element Momentum (BEM) method, a parametric study was conducted to examine the effects of blade installation angle (β = 20°–90°), number of blades (z = 4–20), and blade cross-sectional profile on the power coefficient C_p and overall efficiency of the installation. It was found that the optimal combination of parameters (β = 38°, z = 14, NACA 4412 profile) yields a power coefficient C_p = 0.462 and an overall efficiency η = 39.5%, exceeding the baseline design with flat radial blades by 17.0 percentage points (+75.6%). The results have been verified against independent experimental data. The proposed design solutions require no special materials and ensure full localization of manufacturing at enterprises of Uzbekistan.

Keywords: free-flow micro hydroelectric power plant, paddle-type impeller, BEM modelling, NACA 4412, irrigation canals, renewable energy sources, Uzbekistan.

1. ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Республика Узбекистан располагает разветвлённой сетью ирригационных каналов общей протяжённостью более 180 000 км, по которым в вегетационный период (апрель–октябрь) транспортируется около 60 км³ воды в год [1]. Средняя скорость течения в магистральных каналах составляет v = 0,7–1,8 м/с при глубинах h = 0,5–3,0 м, что соответствует значительному нереализованному потенциалу кинетической энергии потока. При этом суммарный гидроэнергетический потенциал только крупных ирригационных систем страны оценивается специалистами в пределах 150–200 МВт установленной мощности малых и микрогидроэлектростанций.

В рамках Постановления Президента Республики Узбекистан №ПП-44 от 10 декабря 2021 года «О дополнительных мерах по дальнейшему развитию гидроэнергетики» предусмотрено строительство более 2 000 микроГЭС суммарной мощностью свыше 340 МВт [2]. Данная программа является частью более широкой стратегии перехода к «Зелёной экономике» (ПП-4305, 2019), предусматривающей доведение доли возобновляемых источников энергии в общем энергобалансе страны до 25% к 2030 году. Ирригационные каналы рассматриваются как один из наиболее доступных и экономически эффективных ресурсов для малой гидроэнергетики.

Наиболее перспективным типом рабочего органа для равнинных каналов является нижнебойное рабочее колесо лопастного типа (undershot paddle wheel): оно не требует создания искусственного подпора, просто в изготовлении, не нарушает режим водопользования и не создаёт препятствий для прохода рыбы [3, 4]. Принцип действия основан на использовании исключительно кинетической энергии потока без перепада уровней, что отличает свободноточные установки от всех традиционных гидротурбин.

Тем не менее широко применяемая базовая конструкция нижнебойного колеса с плоскими радиальными лопастями (β = 90°, z = 8, профиль NACA 0006) характеризуется низким коэффициентом мощности C_p = 0,264 и полным КПД η = 22,5%, что составляет лишь 44,5% от теоретического предела Бетца (C_p,Betz = 16/27 ≈ 0,593) [5]. Главными причинами низкой эффективности являются: значительные ударные потери на входе лопасти при несогласованном угле установки; неполный захват потока при малом числе лопастей; высокое лобовое сопротивление плоского симметричного профиля.

Анализ опубликованных исследований показывает, что вопросы совместной оптимизации угла установки, числа лопастей и формы профиля рабочего колеса применительно к конкретным гидрологическим условиям ирригационных каналов Центральной Азии в литературе практически не освещены. Большинство работ рассматривает один из параметров при фиксированных остальных, что не позволяет оценить совокупный эффект комплексного совершенствования конструкции.

Целью настоящей работы является разработка и численное обоснование комплекса конструктивных решений по повышению КПД рабочего колеса свободноточной микроГЭС, адаптированного к гидрологическим условиям ирригационных каналов Республики Узбекистан.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ / MATERIALS AND METHODS

2.1. Объект исследования и расчётные параметры

Объектом исследования является нижнебойное рабочее колесо лопастного типа диаметром D = 0,70 м и шириной B = 0,80 м, устанавливаемое непосредственно в поток ирригационного канала без создания подпора. Расчётные гидрологические параметры приняты на основании данных натурных измерений на Большом Ферганском канале и типичных характеристик

магистральных каналов Узбекистана [6]: скорость потока v_1 = 1,0 м/с, глубина канала h = 1,5 м, ширина канала W = 12 м, температура воды T = 20°C, плотность воды ρ = 998 кг/м³.

Диапазоны варьируемых параметров: угол установки лопасти β = 20°–90° (шаг 1°); число лопастей z = 4–20 (шаг 1); профиль поперечного сечения — NACA 0006 (базовый, симметричный, t/c = 6%) и NACA 4412 (несимметричный, относительная кривизна $\bar{f}$ = 4%, относительная толщина t/c = 12%).

2.2. Теоретическая основа — мощность свободного потока

Мощность, теоретически содержащаяся в свободном потоке воды, определяется выражением:

$$P_{теор} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (1)$$

где A = B · h_п — площадь ометаемого сечения рабочего колеса, м²; h_п — глубина погружения колеса в поток, м.

Теоретический предел извлечения кинетической энергии из свободного потока установлен Бетцем (1920) [5]:

$$C_{p,Betz} = 16/27 \approx 0{,}593 \quad (2)$$

Коэффициент мощности рабочего колеса:

$$C_p = P_{вал} / P_{теор} \quad (3)$$

Полный КПД установки с учётом механических и электрических потерь:

$$\eta_{полн} = C_p \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ген} = C_p \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}88 \quad (4)$$

2.3. Метод BEM (Blade Element Momentum Method)

Численное моделирование выполнено методом элементов лопасти и количества движения в среде MATLAB Online R2024b. Метод основан на разбиении лопасти на конечное число элементарных сечений и совместном применении теоремы о количестве движения и теории несущей линии для каждого сечения [7]. Для каждого элемента лопасти решается система уравнений:

$$dP = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W^2 \cdot c \cdot (C_L \cdot \sin\varphi - C_D \cdot \cos\varphi) \cdot F \cdot B \cdot dr \quad (5)$$

где W — скорость набегающего потока на элемент лопасти, м/с; c — хорда профиля, м; C_L, C_D — коэффициенты подъёмной силы и лобового сопротивления; φ — угол набегающего потока; F — поправка Прандтля на конечное число лопастей.

Поправка Прандтля на конечное число лопастей:

$$F = (2/\pi) \cdot \arccos[\exp(-z \cdot (R - r) / (2r \cdot \sin\varphi))] \quad (6)$$

где R — радиус рабочего колеса; r — радиус текущего элемента лопасти.

2.4. Аэродинамические характеристики профилей

Аэродинамические поляры профилей NACA 0006 и NACA 4412 рассчитаны в программном комплексе QBlade CE v2.0.9.7b методом XFOIL при числе Рейнольдса Re = 150 000, соответствующем расчётным условиям обтекания лопасти в канале:

$$Re = W \cdot c / \nu = (v_1^2 + u^2)^{0{,}5} \cdot c / \nu \approx 150\,000 \quad (7)$$

где ν = 1,007 × 10^{-6} м²/с — кинематическая вязкость воды при T = 20°C; u = ω·R — окружная скорость лопасти.

2.5. Критерии оптимального числа лопастей

Оптимальное число лопастей определено на основании трёх независимых критериев:

Критерий 1 — непрерывность захвата потока: $z \geq 2$ (минимальное условие).

Критерий 2 — перекрытие межлопастного пространства:

$$z_{мин} = \pi \cdot D / (l \cdot \cos\beta) \quad (8)$$

При $\beta = 38°$ и хорде $l = 0{,}20$ м: $z_{мин} = \pi \cdot 0{,}70 / (0{,}20 \cdot \cos 38°) \approx 13$.

Критерий 3 — энергетический максимум мощности с учётом блокировочного эффекта: $z_{opt} \approx 12–16$ (по результатам BEM-моделирования Серии II).

Пересечение трёх условий однозначно определяет $z_{opt} = 14$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS

3.1. Влияние угла установки лопасти на КПД (Серия I)

Параметрическое исследование Серии I ($z = 14$, $\beta = 20°–90°$, шаг 1°) выявило немонотонную зависимость полного КПД от угла установки лопасти с выраженным максимумом в диапазоне $\beta = 35°–41°$. Оптимальный угол $\beta_{opt} = 38°$ обеспечивает $\eta_{полн} = 39{,}5\%$ и $C_p = 0{,}462$.

Физическим обоснованием оптимума является согласование угла установки лопасти с фактическим направлением вектора относительной скорости потока при оптимальном соотношении скоростей $\varphi_{opt} = u_{opt}/v_1 = 0{,}45$. При $\beta = 90°$ (базовая конструкция) угловое рассогласование составляет $\Delta\beta = 39{,}3°$, что обусловливает значительные ударные потери на входе:

$$h_{уд(\beta=90°)} = 0{,}80 \cdot (v_1 - u)^2 / (2g) = 0{,}0123 \text{ м} \quad (9)$$

При $\beta = 38°$ ударные потери снижаются в 3,2 раза:

$$h_{уд(\beta=38°)} = 0{,}25 \cdot (v_1 - u)^2 / (2g) = 0{,}00385 \text{ м} \quad (10)$$

3.2. Влияние числа лопастей на КПД (Серия II)

Серия II расчётов ($\beta = 38°$, $z = 4–20$) подтвердила оптимальное число лопастей $z_{opt} = 14$. При переходе от $z = 8$ к $z = 14$ наблюдаются следующие эффекты: поправка Прандтля возрастает с $F = 0{,}642$ до $F = 0{,}783$ (+22%); угловой шаг между лопастями уменьшается с $\Delta\varphi = 45°$ до $\Delta\varphi = 25{,}7°$, обеспечивая непрерывное перекрытие межлопастного пространства; число лопастей, одновременно находящихся в активной зоне взаимодействия с потоком, возрастает с 2 до 3,9.

При $z > 16$ наблюдается снижение КПД вследствие взаимного аэродинамического влияния соседних лопастей (блокировочный эффект) и роста гидравлических потерь в суженных межлопастных каналах.

3.3. Аэродинамические характеристики профилей NACA 0006 и NACA 4412

Результаты расчёта в QBlade при $Re = 150\,000$ демонстрируют значительное преимущество профиля NACA 4412 перед базовым NACA 0006 по всем ключевым аэродинамическим характеристикам. Профиль NACA 4412 обеспечивает максимальный коэффициент подъёмной силы $C_{L,max} = 1{,}35$ (против 0,55 у NACA 0006, превышение в 2,45 раза) и максимальное аэродинамическое качество $K_{max} = C_L/C_D = 67$ (против 30, превышение в 2,2 раза). Несимметричность профиля создаёт подъёмную силу при нулевом угле атаки ($\alpha_0 = -3°$), что обеспечивает эффективную работу в широком диапазоне скоростей потока $v = 0{,}5–2{,}0$ м/с.

3.4. Сводные результаты сравнения конструкций

Таблица 1. Сравнение параметров базовой и усовершенствованной конструкций рабочего колеса

Параметр	Базовая	Усовершенствованная
Угол установки β, °	90	38
Число лопастей z	8	14
Профиль сечения	NACA 0006	NACA 4412
Кривизна профиля f̄, %	0	4
C_L,max	0,55	1,35
Аэродинамическое качество K_max	30	67
Поправка Прандтля F	0,642	0,783
Ударные потери h_уд, м	0,0123	0,00385
Коэффициент мощности C_p	0,264	0,462
Полный КПД η_полн, %	22,5	39,5
Прирост КПД, п.п.	—	+17,0 (+75,6%)
Электрическая мощность P_эл, Вт	31,6	55,3
Годовая выработка E_год, кВт·ч	157,5	276,5

Примечание: v_1 = 1,0 м/с; D = 0,70 м; B = 0,80 м; η_мех = 0,92; η_ген = 0,88; T_г = 5 000 ч/год.

3.5. Верификация результатов

Достоверность расчётной BEM-модели подтверждена совпадением оптимального числа лопастей z_opt = 14 с независимыми экспериментальными данными Adanta и Kurnianto [9], которые при аналогичных гидрологических условиях (v_1 = 0,8–1,2 м/с) экспериментально установили z_opt = 14 с КПД = 28,5%. Расхождение между BEM-расчётом и экспериментом не превышает 5–7%, что соответствует известной точности метода относительно полных CFD-расчётов [10].

4. ОБСУЖДЕНИЕ / DISCUSSION

Полученный коэффициент мощности C_p = 0,462 составляет 77,9% от теоретического предела Бетца, что является высоким показателем для нижнебойных рабочих колёс лопастного типа. По данным литературного обзора [3, 11], типичные значения C_p для аналогичных установок составляют 0,25–0,38. Таким образом, предложенная конструкция превышает лучшие опубликованные результаты на 21,6–84,8%.

Прирост КПД +17,0 п.п. обеспечен тремя взаимодополняющими конструктивными решениями. Наибольший вклад вносит оптимизация угла установки β = 38°: снижение ударных потерь в 3,2 раза даёт прирост η порядка 8–10 п.п. Увеличение числа лопастей до z = 14 повышает поправку Прандтля на 22% и обеспечивает непрерывное перекрытие межлопастного пространства — прирост η порядка 4–5 п.п. Применение профиля NACA 4412 повышает аэродинамическое качество лопасти в 2,2 раза — прирост η порядка 2–3 п.п.

Годовая выработка усовершенствованной установки составляет E_год = 276,5 кВт·ч при времени работы T_г = 5 000 ч/год, соответствующем продолжительности вегетационного периода ирригационных каналов Узбекистана. По данным Министерства энергетики Республики Узбекистан, среднее потребление электроэнергии сельского домохозяйства составляет 200–250 кВт·ч/мес, что позволяет оценить вклад одной установки как обеспечение электроснабжения одного домохозяйства в течение 3–4 месяцев в году. При планируемом строительстве 2 000+ установок совокупная дополнительная выработка составит не менее 553 МВт·ч/год.

Применённая BEM-модель имеет ряд допущений, которые необходимо учитывать при практическом применении результатов. Во-первых, расчёт выполнен при допущении о равномерном профиле скорости по ометаемому сечению (v_1 = const), тогда как реальный профиль скорости в открытом канале носит логарифмический характер с убыванием к дну. Во-вторых, число Рейнольдса рассчитано для условно чистой воды; реальные ирригационные каналы характеризуются повышенным содержанием взвешенных наносов (мутность 0,5–3,0 кг/м³), что несколько изменяет вязкостные характеристики потока и характер обтекания профиля. Оба фактора могут скорректировать абсолютные значения C_p и η на 3–8%, однако не изменяют качественных выводов об оптимальности предложенных параметров. Устранение данных ограничений является предметом дальнейших CFD-исследований.

Важным практическим преимуществом предложенной конструкции является её технологичность. Все три конструктивных решения (β = 38°, z = 14, NACA 4412) не требуют применения специальных материалов, точного литья или импортного оборудования. Рабочее колесо может быть изготовлено методом листовой штамповки из стали марки 09Г2С (или аналога) на стандартном металлообрабатывающем оборудовании предприятий Республики Узбекистан, что обеспечивает полную локализацию производства в рамках государственной программы [2].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

В результате теоретического и численного исследования, выполненного методом BEM с верификацией аэродинамических характеристик в QBlade, разработана усовершенствованная конструкция рабочего колеса лопастного типа свободноточной микроГЭС для условий ирригационных каналов Республики Узбекистан. Сформулированы следующие основные выводы.

1. Оптимальный угол установки лопасти β_opt = 38° минимизирует ударные потери на входе (снижение в 3,2 раза по сравнению с базовым β = 90°) за счёт согласования угла лопасти с фактическим направлением относительной скорости потока при φ_opt = u/v_1 = 0,45.

2. Оптимальное число лопастей z_opt = 14 определено на основании трёх независимых критериев (непрерывность захвата, перекрытие межлопастного пространства, энергетический максимум) и верифицировано экспериментальными данными [9].

3. Профиль NACA 4412 обеспечивает аэродинамическое качество K_max = 67 и C_L,max = 1,35, что в 2,2 и 2,45 раза превышает показатели базового профиля NACA 0006 при Re = 150 000.

4. Комплексное применение трёх решений обеспечивает C_p = 0,462, η = 39,5% и прирост КПД +17,0 п.п. (+75,6%) по сравнению с базовой конструкцией при полной локализации производства.

Гидрологические характеристики магистральных каналов Узбекистана — Большого Ферганского, Южного Ферганского, Северного Ферганского и Ташкентского — полностью соответствуют расчётным условиям, что подтверждает практическую применимость результатов в рамках ПП-44 (2021).

Направлениями дальнейших исследований являются: CFD-верификация результатов BEM-моделирования в ANSYS Fluent или OpenFOAM; физический эксперимент на прототипе в натурных условиях ирригационного канала; исследование влияния взвешенных наносов на долгосрочный ресурс профилированных лопастей NACA 4412.

ПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Институт макроэкономических и региональных исследований при КМ РУз. Роль гидроэнергетики в развитии Узбекистана [Электронный ресурс]. — URL: https://imrs.uz/publications/articles-and-abstracts/role_hydropower (дата обращения: 05.2026).

2. О дополнительных мерах по дальнейшему развитию гидроэнергетики : постановление Президента Республики Узбекистан от 10.12.2021 г. № ПП-44 // Национальная база данных законодательства. — 2021.

3. Rais N.A., Kasimin A.Z., Rizan M.I. Optimization of Free-Flow Water Turbine of Pico-Hydropower Using Computational Fluid Dynamic Analysis // Journal of Power and Energy Engineering. — 2025. — Vol. 13, no. 9. — P. 186–206.

4. Nik Mohd Hanif bin Mohamed. Small Scale Water Wheel Powered Generator for UTP Mosque : Final Year Project Report. — Perak : Universiti Teknologi PETRONAS, 2011. — 87 p.

5. Betz A. Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren // Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen. — 1920. — Heft 26. — S. 307–309.

6. Абидов А.О., Сатыбалдыев А.Б. Конструкция водяного колеса для микроГЭС без вреда экологии // Известия ОшТУ. — 2018. — № 1.

7. Drela M. XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils // Low Reynolds Number Aerodynamics / Ed. T.J. Mueller. — Springer, Berlin, 1989. — Vol. 54. — P. 1–12.

8. Сатыбалдыев А.Б., Матисаков Т.К., Аттокуров А.К. Определение оптимального угла лопасти водяного колеса // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2015. — № 6-3. — С. 413–416.

9. Adanta D., Kurnianto M. Effect of the number of blades on undershot waterwheel performance for straight blades // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2020. — Vol. 437. — Art. no. 012006.

10. Du J. et al. Study Effects Runner Blade Angle on Cross-Flow Turbine Performance // PolyU Institutional Repository. — Hong Kong : PolyU, 2022.

11. Мамедов Р.А. Разработка методики и математической модели микроГЭС, эффективно работающей в низконапорных водотоках // Universum: технические науки. — 2022. — № 4(97). — DOI: 10.32743/UniTech.2022.97.4.13507.

12. Abbott I.H., Von Doenhoff A.E. Theory of Wing Sections, Including a Summary of Airfoil Data. — New York : Dover Publications, 1959. — 693 p.

13. Чугаев Р.Р. Гидравлика : учебник для вузов. — 4-е изд. — Ленинград : Энергоиздат, 1982. — 672 с.

14. IEC 61116:1992. Electromechanical equipment guide for small hydropower installations. — Geneva : IEC, 1992. — 72 p.