

МЕТОДИКА ВЫБОРА И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОГЭС НА ЗАТВОРАХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

¹М.М. Мухаммадиев, ¹К.С. Джуроев, ¹Д.А. Маматкулов, ²Н.М. Хасанзода

¹Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Республика Узбекистан

²Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В данной статье подробно исследуется актуальная возможность эффективного использования гидравлической энергии водных потоков на существующих гидротехнических сооружениях с плоскими затворами для автономной выработки экологически чистой электроэнергии с помощью микроГЭС. В работе представлена и научно систематизирована комплексная методика определения ключевых технико-экономических параметров микрогидроэлектростанций, которая охватывает гидравлические расчеты напора и мощности, а также детальную оценку экономических показателей. Авторами последовательно рассчитываются объемы годовой выработки электроэнергии, необходимые первоначальные капитальные вложения, текущие эксплуатационные затраты, потенциальная экономия условного топлива, чистая прибыль и итоговый срок окупаемости энергетических установок. В практической части статьи приведены точные результаты численных расчетов для широкого диапазона расхода воды от 0,5 до 6,2 м³/с и соответствующей мощности оборудования от 12,05 до 98,23 кВт. Полученные авторами данные наглядно демонстрируют закономерное снижение расчетного срока окупаемости проекта с 4,960 до 3,029 лет при увеличении установленной мощности микроГЭС. Сформулированные выводы и результаты позволяют научно обосновать экономическую и техническую целесообразность массового применения микроГЭС на гидротехнических затворах в условиях современных водозаборных, водовыпускных и водопропускных сооружений. Разработанный подход вносит значительный вклад в развитие малой гидроэнергетики и рациональное использование водных ресурсов региона.

Ключевые слова: микроГЭС, гидротехнический затвор, гидравлический напор, расход воды, мощность, выработка электроэнергии, капитальные вложения, экономическая эффективность.

МЕТОДИКА И ИНТИБОҶ ВА АСОСНОҚ КУНИИ ТЕХНИКИ- ИҚТИСОДИИ ПАРАМЕТРҲОИ НБО-И ХУРД ДАР ДАРОМАДҶОҶИ ИНШОҶОИ ГИДРОТЕХНИКӢ

¹М.М. Муҳаммадиев, ¹К.С. Джуроев, ¹Д.А. Маматкулов, ²Н.М. Хасанзода

¹Донишгоҳи давлатии техникии Тошканд ба номи Исмоил Каримов, Ҷумҳурии Ўзбекистон

²Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар ин мақола имконияти муҳими истифодаи самарабахши энергияи гидравликии ҷараёнҳои об дар иншооти гидротехникии дорои дарвозаҳои ҳамвор барои тавлиди мустақили неруи барқи аз ҷиҳати экологӣ тоза тавассути неругоҳҳои барқиб обӣ хурд (НБОХ) ба таври муфассал баррасӣ шудааст. Дар асоси маводҳои аввалия, методикаи муқаммал ва мунтазами муайян кардани нишондиҳандаҳои техникии ва иқтисодии НБОХ таҳия гардидааст, ки он ҳисоби фишори гидравликии об, тавоноӣ ва арзёбии нишондиҳандаҳои асосии иқтисодиро дар бар мегирад. Ин методология ҳисобкунии тавлиди солонаи неруи барқ, маблағгузори асосии аввалия, хароҷоти ҳарсолаи истисморӣ, сарфаи сӯзишвории шартӣ, ғайдаи соф ва муҳлати ҳудқафоятии (бозгардони маблағ) иншооти энергетикӣ таъмин менамояд. Дар қисми амалии қор натиҷаҳои дақиқи ҳисобкунӣ барои доираи васеи сарфи оби 0,5 - 6,2 м³/с ва тавоноии таҷхизоти 12,05 - 98,23 кВт оварда шудаанд. Маълумоти бадастомада нишон медиҳанд, ки бо афзоиши тавоноии НБОХ муҳлати ҳисобшудаи ҳудқафоятии лоиҳа аз 4,960 то 3,029 сол ба таври қонунӣ коҳиш меёбад. Натиҷаҳои бадастомада имкон медиҳанд, ки истифодаи самаранокӣ неругоҳҳои хурди барқи обӣ дар дарвозаҳои гидротехникии дар шароити иншооти обгирӣ, оббароранда ва обқатқунии дарёҳо ва каналҳо аз ҷиҳати техникии ва иқтисодӣ асоснок карда шаванд. Равиши пешниҳодшуда барои рушди энергетикаи хурд ва истифодаи оқилонаи захираҳои оби минтақа аҳамияти қалон дорад.

Калидвожаҳо: неругоҳи хурди барқи обӣ (НБОХ), дарвозаи гидротехникӣ, фишори гидравликӣ, сарфи об, тавоноӣ, тавлиди неруи барқ, маблағгузори асосӣ, самаранокӣ иқтисодӣ.

METHODOLOGY FOR THE SELECTION AND TECHNO-ECONOMIC FEASIBILITY STUDY OF MICRO-HYDRO POWER PLANT PARAMETERS AT HYDROTECHNICAL STRUCTURE GATES

¹M.M. Mukhammadiev, ¹K.S. Dzhuzaev, ¹D.A. Mamatkulov, ²N.M. Khasanzoda

¹Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Republic of Uzbekistan

²Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan

This article comprehensively examines the relevant feasibility of utilizing the hydraulic energy of water flows at existing hydraulic structures equipped with flat slide gates for autonomous, eco-friendly electricity generation via micro hydropower plants (micro HPPs). Based on extensive source materials, a fully systematized methodology has been developed to determine the critical technical and economic parameters of micro HPPs, integrating hydraulic calculations of head and capacity with financial evaluation. The proposed methodology step-by-step encompasses the calculations of annual electricity generation, initial capital investments, annual operating expenses, potential equivalent fuel savings, net profit, and the final payback period of the energy installations. In the practical section, precise computational results are presented for a wide water flow rate range of 0.5 to 6.2 m³/s and a corresponding equipment capacity range of 12.05 to 98.23 kW. The data obtained by the authors clearly indicate a consistent decrease in the calculated project payback period from 4.960 to 3.029 years as the installed capacity of the micro HPP increases. These essential findings provide a solid scientific and economic justification for implementing micro HPPs

directly at hydraulic gates within water intake, outlet, and water-release structures. This integrated approach contributes significantly to the development of small-scale hydropower engineering and the rational, sustainable use of regional water resources.

Keywords: *micro HPP, hydraulic gate, hydraulic head, water flow rate, capacity, electricity generation, capital investments, economic efficiency.*

Введение (Introduction)

Экологические требования, а также наличие территориально удаленных от электрических сетей сельскохозяйственных объектов небольшой мощности формируют потребность в автономных источниках электроэнергии. Развитие генерирующих мощностей, включая возобновляемые источники энергии, рассматривается как одно из направлений развития электроэнергетики Узбекистана [4]. В исходном материале рассматриваются объекты, расположенные вблизи водных потоков с напорами от 1 до 6 м и энергетическими возможностями в диапазоне от 1 до 100 кВт. Для таких условий перспективным направлением является применение недорогих автономных микроГЭС [1, 6].

Высокая энергетическая плотность водного потока, возможность регулирования его энергии и относительная стабильность режима стока создают предпосылки для использования гидротурбин в составе автономных энергетических установок. Практика применения микроГЭС на существующих гидравлических системах показывает возможность преобразования энергии водного потока в электрическую энергию непосредственно на существующих гидротехнических сооружениях [1, 9]. Вместе с тем применение нерегулируемых гидродвигателей предъявляет повышенные требования к стабилизации напряжения и частоты.

Разработка низконапорных микроГЭС требует предварительного изучения водного объекта, его гидравлических характеристик и диапазонов изменения расхода. Для затворов особенно важным является определение характеристик потока непосредственно в плоскости затвора: расчетные и экспериментальные исследования показывают неравномерность распределения скоростей и наличие вертикальной составляющей скорости [5]. Особый практический интерес представляет размещение микроГЭС непосредственно на затворах гидротехнических сооружений, где уже имеются перепад уровней воды и организованный водопропуск [1, 3, 7, 9, 10].

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве расчетной схемы рассматривается гидроузел энергосистемы, включающий водохранилище, плотину, подводящий и магистральный каналы, распределители, деривационный канал, напорный бассейн, водосброс и реку. В отдельных участках гидроузла предусмотрены гидротехнические затворы, на которых может быть размещена микроГЭС. Возможность такого совмещения с существующими гидросистемами и затворами рассмотрена в работах [1, 3, 7, 9, 10].



Рисунок 1 - Схема гидроузла энергосистемы и предполагаемые места установки микроГЭС.
(Сгенерировано ИИ).

Figure 1- Diagram of the water management and power facility showing proposed installation sites for micro-hydroelectric power plants. (Generated by AI).

Расчетная схема непосредственно установленной на затворе микроГЭС предусматривает входящий расход $Q_{\text{прих}}$ по подводящему каналу, расход $Q_{\text{микроГЭС}}$ через гидроагрегат и уходящий расход $Q_{\text{уход}}$ по отводящему каналу. При установившемся режиме выполняется условие баланса расходов $Q_{\text{микроГЭС}} = Q_{\text{уход}}$. Определение расхода через затвор требует учета распределения скоростей потока в его вертикальном сечении [5].

Напор для микроГЭС определяется по следующему уравнению (1):

$$H = \left(\nabla_{\text{ВБ}} + \frac{Q_{\text{прих}} \cdot t}{S_{\text{дно_вб}}} - \frac{Q_{\text{микроГЭС}} \cdot t}{S_{\text{дно_вб}}} \right) - \left(\nabla_{\text{НБ}} + \frac{Q_{\text{уход}} \cdot t}{S_{\text{дно_нб}}} - \frac{Q_{\text{микроГЭС}} \cdot t}{S_{\text{дно_нб}}} \right) - h_w = [\text{м}]. \quad (1)$$

где $\nabla_{\text{ВБ}}$ – отметка воды до затвора, т.е. отметка верхнего бьефа микроГЭС, м; $\nabla_{\text{НБ}}$ – отметка воды после затвора, т.е. отметка нижнего бьефа микроГЭС, м; $S_{\text{дно_вб}}$ и $S_{\text{дно_нб}}$ – площади дна верхнего и нижнего бьефа, м^2 ; h_w – потеря напора водопроводящего тракта микроГЭС, м; t – время работы микроГЭС, сек.

Потеря напора водопроводящего тракта микроГЭС определяется:

$$h_w = 1,1 \cdot \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{16 \cdot Q_{\text{микроГЭС}}^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^4} = 0,182 \cdot \lambda \cdot \frac{L \cdot Q_{\text{микроГЭС}}^2}{D^5}, [\text{м}]. \quad (2)$$

где L – длина водопроводящего тракта микроГЭС, м; D – диаметр водопроводящего тракта микроГЭС, м; λ – коэффициент гидравлического трения и определяется:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_s}{D} \right). \quad (3)$$

где Δ_s – коэффициент шероховатости стенок.



Рисунок 2 - Схема использования затвора гидротехнического сооружения с микроГЭС. (Сгенерировано ИИ).
Figure 2 - Diagram of a hydraulic structure gate integrated with a micro-hydroelectric power plant. (Generated by AI).

Исходя из того, что входящий расход равен уходящему расходу $Q_{\text{микроГЭС}} = Q_{\text{уход}}$, тогда напор примет такую форму:

$$H = \left(\nabla_{\text{ВБ}} + \frac{Q_{\text{прих}} \cdot t}{S_{\text{дно_вб}}} - \frac{Q_{\text{микроГЭС}} \cdot t}{S_{\text{дно_вб}}} \right) - \left(\nabla_{\text{НБ}} - \frac{Q_{\text{уход}} \cdot t}{S_{\text{дно_вб}}} + \frac{Q_{\text{микроГЭС}} \cdot t}{S} \right) - h_w = \nabla_{\text{ВБ}} - \nabla_{\text{НБ}} + \frac{1}{S_{\text{дно_вб}}} (Q_{\text{прих}} \cdot t - Q_{\text{микроГЭС}} \cdot t) - h_w = [\text{м}] \quad (4)$$

Рассмотрим, что $t=1$ сек, потому что единица измерения расхода $\text{м}^3/\text{сек}$ и $Q \cdot t = W = \text{м}^3$ даёт объем, в этом случае напор определяется по формуле:

$$H = \nabla ВБ - \nabla НБ + \frac{1}{S_{\text{дно_вб}}} (W_{\text{прих}} - W_{\text{микроГЭС}}) - hw = [\text{м}] \quad (5)$$

Полная мощность микроГЭС:

$$N_{\text{микроГЭС}} = 9,81 \cdot Q_{\text{микроГЭС}} \cdot H_{\Gamma} = [\text{кВт}], \quad (6)$$

где H_{Γ} - геометрический напор микроГЭС, который определяется по следующей формуле:

$$H = \nabla ВБ - \nabla НБ + \frac{1}{S_{\text{дно_вб}}} (W_{\text{прих}} - W_{\text{микроГЭС}}) = [\text{м}] \quad (7)$$

Мощность микроГЭС:

$$N_{\text{микроГЭС}} = 9,81 \cdot Q_{\text{микроГЭС}} \cdot H \cdot \eta_{\Gamma A}, [\text{кВт}] \quad (8)$$

где $\eta_{\Gamma A}$ – коэффициент полезного действия гидроагрегата ГЭС, %.

Если микроГЭС пропускает весь проходящий расход через микроГЭС

($Q_{\text{микроГЭС}} = Q_{\text{прих}}$), тогда мощность микроГЭС будет равна:

$$N_{\text{микроГЭС}} = 9,81 \cdot Q_{\text{прих}} \cdot H \cdot \eta_{\Gamma A}, [\text{кВт}] \quad (9)$$

Капитальное вложение для создания микроГЭС на имеющемся затворе ГТС определяется по следующему пути. Такой состав технико-экономической оценки соответствует подходу, использованному для обоснования микроГЭС на затворах гидротехнических сооружений [3] и при разработке программы определения параметров гидроэнергетических установок [2].

$$K_{\text{микроГЭС}} = N_{\text{микроГЭС}} \cdot k_{\text{уд}} = [\text{долл. США}] \quad (10)$$

$$k_{\text{уд}} - \text{удельное капиталовложение на 1 кВт, } \frac{\text{долл.США}}{\text{кВт}}$$

Ежегодная вырабатываемая электроэнергия микроГЭС. Расчет энергетических и экономических показателей с учетом годовой выработки и срока окупаемости применяется также в методиках технико-экономической оценки гидроэнергетических установок [2, 3, 8].

$$\mathcal{E}_{\text{микроГЭС}} = N_{\text{микроГЭС}} \cdot T = 9,81 \cdot H \cdot \eta_{\Gamma A} \cdot T = [\text{кВт} \cdot \text{час}] \quad (11)$$

T – время использования микроГЭС в течение года.

Эксплуатационные затраты по микроГЭС определяются:

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 = [\text{долл. США}] \quad (12)$$

Z_1 – амортизационные расходы: $Z_1 = 0,029 \cdot K = [\text{долл. США}]$.

Z_2 – ремонтные работы: $Z_2 = 0,03 \cdot K = [\text{долл. США}]$.

Z_3 – годовая заработная плата: $Z_3 = m \cdot Z_{\text{зар}} \cdot 12 = [\text{долл. США}]$.

m – количество работников; $Z_{\text{зар}}$ – месячная заработная плата, долл.США.

Цена выработанной электроэнергии микроГЭС:

$$\mathcal{C} = \mathcal{E}_{\text{микроГЭС}} \cdot \beta = [\text{долл.США}]. \quad (13)$$

β – стоимость 1 кВт·час электроэнергии, долл.США/кВт·час.

Экономия топливных ресурсов:

$$П_{\text{топливо}} = \mathcal{E}_{\text{микроГЭС}} G = [\text{кг.у.т.}], \quad (14)$$

G – удельные расход условного топлива, кг/(кВт·час).

Доход от экономии топливных ресурсов:

$$Д_{\text{топливо}} = П_{\text{топливо}} \cdot \mathcal{C}_{\text{топливо}} = [\text{долл.США}]. \quad (15)$$

$\mathcal{C}_{\text{топливо}}$ – средняя цена 1 кг условного топлива, долл.США/кг.

Чистая прибыль от использования микроГЭС:

$$\mathcal{C}_{\Pi} = \mathcal{C} + Д_{\text{топливо}} - Z = [\text{долл.США}]. \quad (16)$$

Сопоставительный экономический коэффициент эффективности:

$$E = \mathcal{C}_{\Pi} / K. \quad (17)$$

Срок окупаемости:

$$T_{\text{ок.}} = 1/E = [\text{год}]. \quad (18)$$

Результаты (Results)

На основе разработанной методики в исходном материале приведены результаты расчета технико-экономических параметров микроГЭС. Расчетная серия включает 16 вариантов. Расход микроГЭС изменяется в зависимости от открытия затвора от 0,5 до 6,2 $\text{м}^3/\text{с}$, а расчетная мощность

— от 12,05 до 98,23 кВт (рис. 3). При этом расчетный напор снижается с 2,89 до 1,90 м (рис. 3). Полученный подход непосредственно соответствует ранее опубликованной методике технико-экономического обоснования микроГЭС на затворах [3] и разработанному программному инструменту определения параметров гидроэнергетических установок [2].

Таблица 1 - Результаты расчета технико-экономического обоснования использования микроГЭС на затворе ГТС
Table 1 – Feasibility study results for the implementation of micro-hydroelectric power plants on hydraulic structure gates

№	H, м	Q, м³/с	N, кВт	K, тыс.\$	Э, кВт·ч	З, тыс.\$	Ц, тыс.\$	Птопл., кг у.т.	Дтопл., тыс.\$	Чп, тыс.\$	Ток, лет
1	2,89	0,5	12,05	20,48	105550,4	4,21	3,17	12929,9	5,17	4,13	4,960
2	2,85	0,8	19,01	32,32	166543,2	4,91	5,00	20401,5	8,16	8,25	3,918
3	2,8	1,2	28,02	47,63	245432,1	5,81	7,36	30065,4	12,03	13,58	3,508
4	2,75	1,6	36,69	62,37	321399,1	6,68	9,64	39371,4	15,75	18,71	3,334
5	2,7	2	45,03	76,55	394444,4	7,52	11,83	48319,4	19,33	23,64	3,237
6	2,65	2,4	53,03	90,16	464567,9	8,32	13,94	56909,6	22,76	28,38	3,177
7	2,58	2,8	60,24	102,40	527679	9,04	15,83	64640,7	25,86	32,64	3,137
8	2,52	3,2	67,24	114,31	589037	9,74	17,67	72157,7	28,86	36,79	3,107
9	2,45	3,6	73,55	125,03	644259,2	10,38	19,33	78921,8	31,57	40,52	3,086
10	2,38	4	79,38	134,95	695390,9	10,96	20,86	85185,4	34,07	43,97	3,069
11	2,33	4,3	83,54	142,02	731840,5	11,38	21,96	89650,5	35,86	46,44	3,058
12	2,3	4,5	86,30	146,72	756018,4	11,66	22,68	92612,3	37,04	48,07	3,052
13	2,25	4,8	90,06	153,09	788888,8	12,03	23,67	96638,9	38,66	50,29	3,044
14	2,17	5,2	94,09	159,96	824242,7	12,44	24,73	100969,7	40,39	52,68	3,036
15	2	5,8	96,73	164,44	847325	12,70	25,42	103797,3	41,52	54,24	3,032
16	1,9	6,2	98,23	166,99	860473,2	12,85	25,81	105408,0	42,16	55,13	3,029

Из таблицы 1 видно, что при увеличении расхода с 0,5 до 6,2 м³/с мощность микроГЭС возрастает с 12,05 до 98,23 кВт (рис. 3). Годовая выработка электроэнергии увеличивается с 105 550,4 до 860 473,2 кВт·ч, а чистая прибыль возрастает с 4,13 до 55,13 тыс.\$, и срок окупаемости уменьшается с 4,960 до 3,029 лет (рис. 4).

В исходном материале также установлена зависимость эксплуатационных затрат, чистой прибыли и срока окупаемости от мощности микроГЭС. С ростом мощности наблюдается увеличение абсолютной чистой прибыли и сокращение периода возврата капитальных вложений (рис. 4).

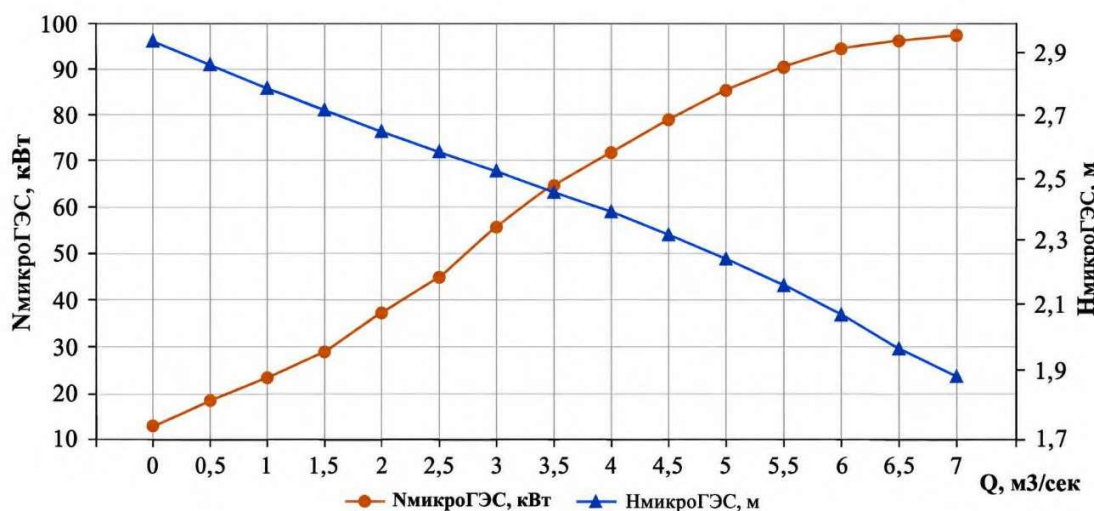


Рисунок 3 - График зависимости напора и мощности микроГЭС от расхода
Figure 3 - Graph of micro-HPP head and power versus flow rate

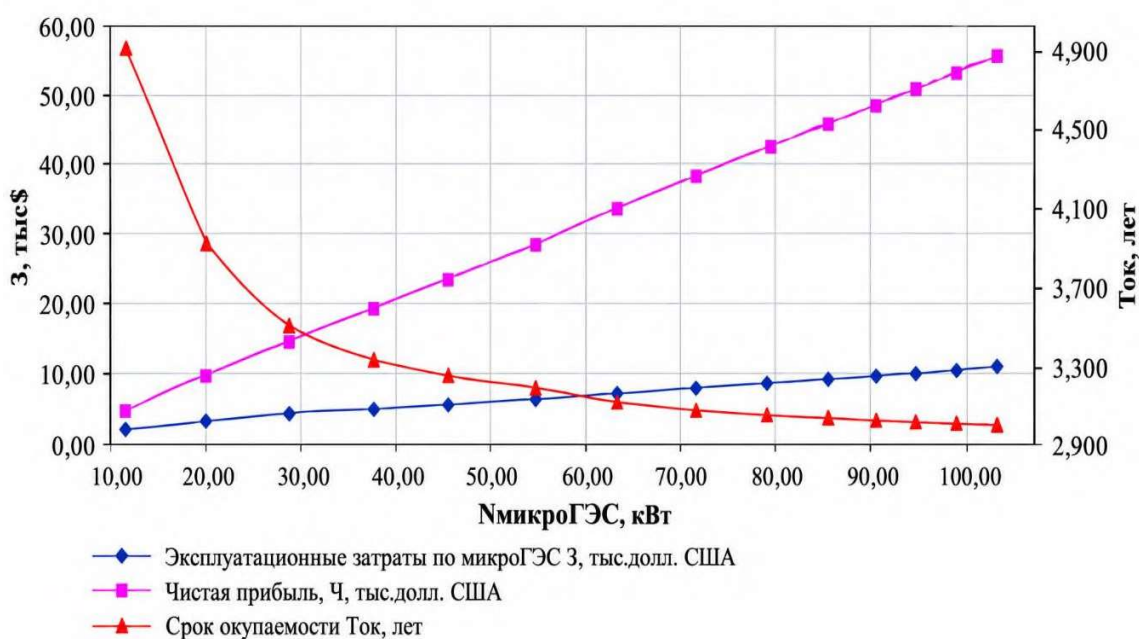


Рисунок 4 - График зависимости чистой прибыли, эксплуатационных затрат и срока окупаемости от мощности микроГЭС

Figure 4 - Graph of net profit, operating expenses, and payback period versus micro-HPP capacity

Обсуждение (Discussions)

Полученные результаты показывают, что размещение микроГЭС непосредственно на затворе гидротехнического сооружения позволяет использовать существующий гидравлический перепад без строительства отдельного крупного гидротехнического комплекса. Такая концепция использования существующей гидравлической инфраструктуры и готового напора рассмотрена в работах [1, 7, 9, 10]. Экономический эффект определяется одновременно расходом воды, доступным напором, КПД гидроагрегата, временем работы и удельными капитальными затратами [3,8].

Для малых расходов экономические показатели менее благоприятны: при мощности 12,05 кВт срок окупаемости составляет 4,960 года. При мощности 98,23 кВт этот показатель снижается до 3,029 года. Таким образом, в рассматриваемой расчетной серии увеличение мощности сопровождается повышением экономической эффективности. Аналогичная зависимость сокращения срока окупаемости при увеличении мощности микроГЭС отмечена в исследовании применения микроГЭС на плоских затворах [10].

Согласно исходному материалу, микроГЭС целесообразно условно разделять на две группы: до 10 кВт и свыше 10 кВт. Установки первой группы могут применяться на малых водотоках с расходом до 1 м³/с, тогда как установки второй группы ориентированы на водотоки с расходом более 1 м³/с. МикроГЭС мощностью свыше 10 кВт могут размещаться на сооружениях с плоскими затворами, включая водозаборные и водопропускные сооружения рек и каналов [10]. Возможность энергетического использования низконапорных и ранее неэнергетических гидротехнических объектов также подтверждается исследованием потенциала водяных мельниц, водосливов и неэнергетических плотин в странах ЕС [6].

При интерпретации результатов следует учитывать, что приведенные экономические значения получены в рамках исходных допущений по стоимости электроэнергии, условного топлива, капитальным и эксплуатационным затратам. Поэтому при проектировании конкретного объекта необходима актуализация этих исходных параметров.

Заключение (Conclusions)

Систематизирована методика технико-экономического обоснования микроГЭС, устанавливаемая на затворе гидротехнического сооружения. Методика объединяет гидравлический

расчет напора и мощности с оценкой годовой выработки электроэнергии и основных экономических показателей.

Для расчетной серии при увеличении расхода от 0,5 до 6,2 м³/с мощность микроГЭС возрастает от 12,05 до 98,23 кВт, а срок окупаемости снижается от 4,960 до 3,029 лет. Это подтверждает наличие положительной зависимости экономической эффективности от увеличения мощности в рассмотренном диапазоне.

Энергетический потенциал гидротехнических затворов водозаборных, водовыпускных и водопропускных сооружений малых и средних водотоков может быть использован для повышения энергообеспечения хозяйственных объектов, энергоресурсосбережения и рационального использования водной энергии. Такой подход соответствует ранее предложенным решениям по использованию микроГЭС с существующими гидросистемами и новым конструкциям затворов [1, 7, 9, 10].

Палуанов Д. Т. — доктор технических наук, профессор кафедры «Гидроэнергетика и гидравлика» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова.

Литература

1. Мухаммадиев, М.М. Технико-экономическое обоснование использования микрогидроэлектростанций на затворах гидротехнического сооружения / М.М. Мухаммадиев, К.С. Джураев, Абдурауф Абдуазиз уулу, Б.Б. Махмарасулов // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – 2021. – № 4. – Ташкент. – С. 334–339.
2. Мухаммадиев, М.М. Исследование скорости потока воды в затворах гидроэнергетических и ирригационных сооружений / М.М. Мухаммадиев, Ш. Клычев, К.С. Джураев // Вестник СГАСУ: Градостроительство и архитектура. – 2016. – Вып. № 2.
3. Punys, P. An Assessment of Micro-hydropower Potential at Historic Watermill, Weir, and Non-powered Dam Sites in Selected EU Countries / P. Punys, A. Kvaraciejus, A. Dumbrasukas, L. Šilinis, B. Popa // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 133. – April.
4. Кодиров, Д.Б. Разработка опытного образца микрогидроэлектростанции / Д.Б. Кодиров, Г.А. Кушаков, У.Б. Худойбердиев // V Международная научно-практическая онлайн-конференция «Энерго- и ресурсосберегающие технологии: опыт и перспективы». – Кызылорда: КУ им. Коркыт Ата, 2023. – С. 8–13.
5. Kodirov, D. Effective Use of Electrical Energy in Hydro Station / D. Kodirov, G. Kushakov, U. Xudoyberdiyev // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 10, Issue 7. – P. 135–142.
6. Укрепительная цементация оснований плотин в гидротехнических сооружениях / А.Д. Ятимов, Н.М. Хасанов, Ф.А. Холов, М.Н. Хасанов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2023. – № 1 (61). – С. 176–182. – EDN: LDLVEE.
7. Bokiev, A. Determination of Energetic Parameters of Garland Mobile Micro-hydro Power Plant for Mountain Areas / A. Bokiev, S. Sultonov // Journal of Electrical and Electronics Engineering (JEEE). – India, 2023. – Vol. 13, Issue 2.
8. Bokiev, A. Design of Mobile Electricity Based on Solar and Garland Micro Hydro Power Plant for Power Supply in Namangan Region Mountain Areas / A. Bokiev, S. Sultonov, N. Nuralieva, A. Botirov // E3S Web of Conferences. – Tashkent, 2023. – Vol. 365. – Art. 04003. – DOI: 10.1051/e3sconf/202336504003.
9. Палуанов, Д.Т. Установление критериев безопасности длительно эксплуатируемых каналов / Д.Т. Палуанов, Д.А. Маматкулов, С.Ф. Саидов, Ж. Ахмедов // Неделя науки Инженерно-строительного института: материалы конференции. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025. – С. 373–376.
10. Развитие генерирующих мощностей – ТЭС, АЭС, ВИЭ – основополагающие в развитии электроэнергетики Узбекистана: материалы круглого стола с участием экспертов при Агентстве информации и массовых коммуникаций при Администрации Президента Республики Узбекистан, 28 июня 2019 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xs.uz/ru/post/razvitie-generiruyuschikh-moschnostej-tes-aes-vie-osnovopolagayuschie-v-razvitii-v-elektroenergetiki-uzbekistana>.
11. Маматкулов, Д.А. Разработка измерительных систем для контроля и управления расходом воды в каналах / Д.А. Маматкулов, А.К. Мамбетов // Цифровая промышленность и автоматизация: инновационные решения в технологических процессах и системах управления производством: сборник материалов Республиканской научно-практической конференции, Каршинский государственный технический университет, 18–19 апреля 2025 г. – 2025. – С. 172–176.

Reference

1. Mukhammadiev, M.M. Technical and Economic Justification of the Use of Micro-Hydroelectric Power Plants at Hydraulic Structure Gates / M.M. Mukhammadiev, K.S. Dzhuraev, Abdurauf Abduaziz uulu, B.B. Makhmarasulov // Problems of Energy and Resource Conservation. – 2021. – No. 4. – Tashkent. – P. 334–339. [in Russian].

2. Mukhammadiev, M.M. Investigation of Water Flow Velocity in Gates of Hydropower and Irrigation Structures / M.M. Mukhammadiev, Sh. Klychev, K.S. Dzshuraev // Bulletin of SGASU: Urban Planning and Architecture. – 2016. – Issue No. 2. [in Russian].
3. Punys, P. An Assessment of Micro-hydropower Potential at Historic Watermill, Weir, and Non-powered Dam Sites in Selected EU Countries / P. Punys, A. Kvaraciejus, A. Dumbrasukas, L. Šilinis, B. Popa // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 133. – April.
4. Kodirov, D.B. Development of a Prototype Micro-Hydroelectric Power Plant / D.B. Kodirov, G.A. Kushakov, U.B. Khudoyberdiyev // Proceedings of the V International Scientific and Practical Online Conference “Energy- and Resource-Saving Technologies: Experience and Prospects”. – Kyzylorda: Korkyt Ata Kyzylorda University, 2023. – P. 8–13. [in Russian].
5. Kodirov, D. Effective Use of Electrical Energy in Hydro Station / D. Kodirov, G. Kushakov, U. Xudoyberdiyev // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 10, Issue 7. – P. 135–142.
6. Strengthening Grouting of Dam Foundations in Hydraulic Structures / A.D. Yatimov, N.M. Khasanov, F.A. Kholov, M.N. Khasanov // Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. – 2023. – No. 1 (61). – P. 176–182. – EDN: LDLVEE. [in Russian].
7. Bokiev, A. Determination of Energetic Parameters of Garland Mobile Micro-hydro Power Plant for Mountain Areas / A. Bokiev, S. Sultonov // Journal of Electrical and Electronics Engineering (JEEE). – India, 2023. – Vol. 13, Issue 2.
8. Bokiev, A. Design of Mobile Electricity Based on Solar and Garland Micro Hydro Power Plant for Power Supply in Namangan Region Mountain Areas / A. Bokiev, S. Sultonov, N. Nuralieva, A. Botirov // E3S Web of Conferences. – Tashkent, 2023. – Vol. 365. – Art. 04003. – DOI: 10.1051/e3sconf/202336504003.
9. Paluanov, D.T. Establishment of Safety Criteria for Long-Term Operated Canals / D.T. Paluanov, D.A. Mamatkulov, S.F. Saidov, Zh. Akhmedov // Science Week of the Institute of Civil Engineering: Proceedings of the Conference. – St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025. – P. 373–376. [in Russian].
10. Development of Generating Capacities – Thermal Power Plants, Nuclear Power Plants, and Renewable Energy Sources – as Fundamental Factors in the Development of the Electric Power Industry of Uzbekistan: Proceedings of the Round Table with the Participation of Experts at the Agency of Information and Mass Communications under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan, June 28, 2019 [Electronic resource]. – Available at: <https://xs.uz/ru/post/razvitiye-generiruyushchikh-moschnostey-tes-aes-vie-osnovopolagayushchie-v-razvitiy-v-elektroenergetiki-uzbekistana> (Accessed: 08.10.2026). [in Russian].
11. Mamatkulov, D.A. Development of Measurement Systems for Monitoring and Controlling Water Flow in Canals / D.A. Mamatkulov, A.K. Mambetov // Digital Industry and Automation: Innovative Solutions in Technological Processes and Production Control Systems: Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference, Karshi State Technical University, April 18–19, 2025. – 2025. – P. 172–176. [in Russian].

Сведения об авторах:

Муҳаммадиев Мурадулла Муҳаммадиевич, доктор технических наук, профессор, ТашГТУ имени Ислама Каримова. ORCID Id 0009-0007-5636-7337, E.mail: muradgidro@gmail.com, muhammadiev_m@rambler.ru

Джуроев Курбон Салихджанович, PhD, доцент, ТашГТУ имени Ислама Каримова. ORCID Id 0000-0003-4294-2891, E.mail: DjQS1983@gmail.com

Маматкулов Дилмурат Абдуганиевич, доцент, ТашГТУ имени Ислама Каримова. ORCID Id 0009-0005-8899-2044, dmamatkulov0985@gmail.com

Хасанзода Нурали Мамед, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» Таджикского технического университета имени академика М.С.Осими. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6718-6693>. E-mail: khasanov.nurali@mail.ru

Маълумот оид ба муаллифон:

Муҳаммадиев Мурадулла Муҳаммадиевич, доктори илмҳои техникӣ, профессор, Донишгоҳи давлатии техникии Тошканд ба номи Исмоил Каримов. ORCID Id 0009-0007-5636-7337, E.mail: muradgidro@gmail.com, muhammadiev_m@rambler.ru

Джуроев Курбон Салихджанович, PhD, дотсент, Донишгоҳи давлатии техникии Тошканд ба номи Исмоил Каримов. ORCID Id 0000-0003-4294-2891, E.mail: DjQS1983@gmail.com

Маматкулов Дилмурат Абдуганиевич, дотсент, Донишгоҳи давлатии техникии Тошканд ба номи Исмоил Каримов. ORCID Id 0009-0005-8899-2044, dmamatkulov0985@gmail.com

Ҳасанзода Нуралӣ Мамед, доктори илмҳои техникӣ, профессор, профессори кафедраи асосҳо, таҳкурсии ва иншоотҳои зерзаминӣ, Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С.Осимӣ. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6718-6693>. E-mail: khasanov.nurali@mail.ru

Information about the authors:

Muradulla Mukhammadievich Mukhammadiev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Islam Karimov Tashkent State Technical University. ORCID Id 0009-0007-5636-7337, E.mail: muradgidro@gmail.com, muhammadiev_m@rambler.ru

Kurban Salikhjanovich Juraev, PhD, Associate Professor, Islam Karimov Tashkent State Technical University. ORCID Id 0000-0003-4294-2891, E.mail: DjQS1983@gmail.com

Dilmurat Abduganievich Mamatkulov, Associate Professor, Islam Karimov Tashkent State Technical University. ORCID Id 0009-0005-8899-2044, dmamatkulov0985@gmail.com

Hasanzoda Nuraly Mamed, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor in the Department of Soil Mechanics, Foundations, and Underground Structures at the Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6718-6693>. E-mail: khasanov.nurali@mail.ru