Article

Использование фотоэлектрической установки для электроснабжения системы собственных нужд гидроэлектростанции: на примере Бозсуйской гидроэлектростанции

Э.К. Кан [1], А.Ш. Абдураимов [1]*, Д.А. Романчёв [1], Б.Ж. Арифбаев [1]

[1] Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт ирригации и механизации сельского хозяйства», Ташкент, 100000, Узбекистан
e.kan@tiiame.uz (К.Э.), a_abduraimov@tiiame.uz (А.А.), demidromancev@gmail.com (Р.Д.) , baxti2arifbaaev@gmail.com (А.Б.)
* Correspondence: a_abduraimov@tiiame.uz; Tel.: +998 93 9192736 (А.А.)

Аннотация: Целесообразность использования солнечных фотоэлектрических установок для электроснабжения системы собственных нужд гидроэлектростанций основывается на оценке экономической эффективности, показателем которой является соотношение между требуемыми капитальными вложениями и достигаемым технико-экономическим эффектом. Задача оценки экономической эффективности является достаточно сложной, поскольку необходимо учитывать большое количество факторов, таких как особенности проектных решений, режимы работы вспомогательных систем, условия эксплуатации солнечных установок и другие. Целью данного исследования является обоснование возможности применения солнечных фотоэлектрических установок для электроснабжения вспомогательных нужд гидроэлектростанции на основе оценки их экономической эффективности. В ходе исследования были использованы следующие методы: обзор и обобщение существующей литературы по данной тематике, системный анализ, сбор данных по различным типам электростанций, а также расчёт их экономической эффективности. Результаты исследования для условий Бозсуйской ГЭС свидетельствуют о целесообразности применения солнечной установки для покрытия собственных нужд станции при её работе в составе энергосистемы, базирующейся на тепловых электростанциях. В этом случае эффективность оказывается в 1,5–2 раза выше по сравнению с гидроэлектростанцией, работающей в автономном режиме. Анализ системы собственных нужд ГЭС и разработка методики оценки эффективности применения солнечных установок для повышения энергетической, экономической и экологической эффективности. Методология исследования основана на сочетании теоретических и эмпирических методов, включая анализ литературы, нормативных документов и обобщение информации. Проект солнечной электростанции мощностью 300 кВт полностью покрывает собственные нужды ГЭС, обеспечивает экономический эффект 25–28 тыс. долл. в год с окупаемостью 7,5–8,3 лет и повышает энергоэффективность, независимость и экологичность объекта. В целом, интеграция солнечной генерации в систему собственных нужд гидроэлектростанции представляет собой эффективное направление модернизации, обеспечивающее устойчивое энергоснабжение, повышение надежности работы объекта и соответствие современным требованиям энергоэффективности и экологической безопасности.

Ключевые слова: гидроэлектростанция, система собственных нужд, эффективность, фотоэлектрические установки, срок окупаемости.

Цитирование: Э.К. Кан, А.Ш. Абдураимов, Д.А. Романчёв, Б.Ж. Арифбаев. Ирригация и мелиорация. **2026**, 12,2, 3. https://doi.org/10.35938/IM-2026-12-00003

Полученный: 10.03.2026
Исправленный: 18.04.2026
Принято: 25.05.2026
Опубликованный: 29.06.2026

Copyright:

OPEN ACCESS

Check for updates

Use of a photovoltaic power system for supplying the auxiliary power needs of a hydroelectric power plant: a case study of the

Bozsuv Hydroelectric Power Plant

Eduard K.Kan [1], Abdulaziz Sh.Abduraimov [1]*, Demid A.Romanchov [1], Baxtiyor J.Arifbayev [1]

[1] "Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers"National research university, Tashkent, 100000, Uzbekistan
e.kan@tiiame.uz (K.E.,), a_abduraimov@tiiame.uz (A.A.,), demidromancev@gmail.com (R.D.,),baxti2arifbaaev@gmail.com (A.B.,)

Abstract:
The feasibility of using solar photovoltaic installations to power the auxiliary systems of hydroelectric power plants is based on the assessment of economic efficiency, the indicator of which is the ratio between the required capital investments and the achieved technical and economic effect. The issue of assessing economic efficiency is a rather complex task, since it is necessary to take into account a large number of factors, such as specific features of design solutions, operating modes of auxiliary systems, operating conditions of solar installations and others. The purpose of this study is to substantiate the possibility of using solar photovoltaic installations to power the auxiliary system of a hydroelectric power plant based on an assessment of their economic efficiency. The following methods were used in the research: review, generalization of existing literature on this issue, their system analysis, collection of data on various types of power plants, calculation of their economic efficiency. The results of the study for the conditions of the Bozsu HPP indicate the feasibility of using a solar installation to power the station's auxiliary needs if it operates in a power system based on thermal power plants. In this case, the efficiency is 1.5-2 times higher than for a hydroelectric power plant operating in an autonomous mode. To analyze the auxiliary power supply system of a hydropower plant and to develop a methodology for assessing the efficiency of solar installations to improve energy, economic, and environmental performance. The research methodology is based on a combination of theoretical and empirical methods, including the analysis of literature, regulatory documents, and the generalization of information. The 300 kW solar power plant project fully covers the hydropower plant's internal needs, provides an annual economic benefit of $25,000–28,000 with a payback period of 7.5–8.3 years, and enhances energy efficiency, independence, and environmental sustainability. Overall, the integration of solar generation into the auxiliary power system of a hydropower plant is an effective modernization approach that ensures reliable energy supply, enhances operational stability, and meets modern requirements for energy efficiency and environmental sustainabilitys.

Key words: hydroelectric power plant, auxiliary systems, efficiency, photovoltaics, payback period.

Введение

Вопросы энергоэффективности технологических процессов в электроэнергетике — как на стадии выработки, так и на стадии потребления электрической энергии — играют важную роль в экономике любого государства [1].

В последнее время значительное внимание уделяется разработке энергоэффективных технологий, позволяющих снизить энергозатраты на производство электроэнергии [2]. По мере развития и внедрения новых технологий производства энергии всё больший интерес вызывает проблематика комбинированной выработки энергии и использования солнечной энергии в качестве ресурса [3]. Одной из актуальных задач является определение и оценка климатических, гидравлических, электрических, технических, энергетических [4] и режимных параметров, а также технических, экономических [5] и экологических показателей возобновляемых электростанций — как по отдельности, так и при их совместной эксплуатации [6].

К сожалению, традиционные методы оценки эффективности электростанций не в полной мере учитывают многие преимущества возобновляемых источников энергии [7]. Так, если такой фактор, как возобновляемость гидроэнергетических ресурсов, может быть учтён за счёт экономии топлива и связанных с этим затрат на его добычу, переработку и транспортировку, то такие факторы, как экологическая безопасность установок на возобновляемых источниках

энергии, которые в настоящее время приобретают всё большую значимость в связи с ухудшением экологической обстановки, зачастую не принимаются во внимание. В то же время учёт данного фактора при определении экономического эффекта от использования установок на возобновляемых источниках энергии является чрезвычайно важным. В настоящее время в энергетике разработаны методы оценки экономической эффективности различных типов электростанций [8]. Однако в связи с возрастающей актуальностью экологических проблем продолжается дальнейшее развитие методов определения экономической эффективности электростанций на основе возобновляемых источников энергии, позволяющих учитывать экологические аспекты.

Гидроэнергетика играет важную роль в мировой энергетической системе, в том числе в Республике Узбекистан. Доля выработки электроэнергии на гидроэлектростанциях составляет порядка 15–18 % от общего объёма мировой генерации электроэнергии [9]. Часть произведённой энергии расходуется на обеспечение собственных нужд электростанций. В связи с этим одним из направлений повышения эффективности гидроэлектростанций и увеличения объёма электроэнергии, отпускаемой в энергосистему, является использование солнечных установок для энергоснабжения вспомогательных систем гидроэлектростанций. Система собственных нужд гидроэлектростанции играет ключевую роль в обеспечении её непрерывной и надёжной работы.

Значительное количество научных работ посвящено оценке экономической эффективности электростанций на основе возобновляемых источников энергии. В частности, следует отметить исследования, посвящённые оценке экономической эффективности солнечных электростанций [10]. Несмотря на наличие научных исследований в области оценки экономической эффективности солнечных установок, в том числе в составе комбинированных электростанций, вопросы оценки применения солнечных установок именно для обеспечения энергией собственных нужд гидроэлектростанций, режим работы которых и, соответственно, график нагрузок имеют специфические особенности, остаются недостаточно изученными. Ранее авторами была предложена методика определения эффективности использования эжектора (энергии воды) в качестве вспомогательной системы водоподъёма.

Целью настоящего исследования является разработка и совершенствование методики оценки эффективности применения солнечных установок для покрытия собственных нужд электростанции, увеличения объёма электроэнергии, отпускаемой в энергосистему, снижения зависимости системы собственных нужд от выработки самой станции и внешних электрических сетей, а также повышения устойчивости и экономической эффективности электроснабжения вспомогательного оборудования. Традиционные схемы электроснабжения собственных нужд, основанные на использовании части собственной генерации, обладают рядом недостатков, таких как потери электроэнергии, зависимость от режимов работы основного оборудования и отсутствие резервирования. Современные решения предусматривают применение автономных источников энергии, включая солнечные панели и системы накопления энергии, что позволяет снизить эксплуатационные затраты, повысить энергетическую независимость и экологическую безопасность функционирования гидроэлектростанций.

Материалы и методы

Методология исследования основана на комплексном научном подходе с использованием теоретических и эмпирических методов. В работе применялись методы анализа научной литературы, изучения нормативно-правовых документов, а также систематизации и обобщения информации. Основными источниками информации послужили научные публикации, данные эксплуатационной службы Бозсуйской ГЭС и нормативно-правовые документы в области энергетики. Методологическая база сформирована на трудах отечественных и зарубежных учёных в сфере энергетики и возобновляемых источников энергии. Для оценки экономической эффективности различных вариантов электростанций был выбран метод приведённых (расчётных) затрат. Метод приведённых затрат (RC) применяется для выбора рационального варианта из числа альтернатив, одинаковых по производственному эффекту либо искусственно приведённых к одинаковым условиям. Сущность метода заключается в следующем. Пусть сравниваются два возможных варианта с одинаковым потребительским эффектом, при котором

CE1 = CE2. Для достижения данного эффекта требуются определённые текущие затраты (расходы) C и освоенные капитальные вложения KI. Между этими показателями, как правило, существует взаимосвязь. Так, например, если капитальные вложения для двух рассматриваемых вариантов различаются и KI2> KI1, то часто имеет место соотношение C1> C2. Критерием эффективности является минимум приведённых (расчётных) затрат:определяемый по формуле (1):

$$RC = C + \lambda KI \rightarrow \text{мин} \quad (1)$$

Коэффициент λ характеризует условия, при выполнении которых обеспечивается минимизация приведённых затрат RC. Для различных вариантов его значение может отличаться в незначительных пределах, то есть $\lambda_{\text{мин}} > \lambda > \lambda_{\text{макс}}$. Значение λ, соответствующее минимальному значению RC, представляет собой расчётный коэффициент экономической эффективности инвестиций и определяет наиболее благоприятный коэффициент дисконтирования, при котором вложение инвестиций в проект является экономически целесообразным.

Результаты

3.1.1.Система собственных нужд Бозсуйской гидроэлектростанции (вспомогательная система) ГЭС-1 расположена на канале Боз-Су и является первой ступенью Ташкентского каскада гидроэлектростанций. Бозсуйская ГЭС-1 оснащена двумя гидроагрегатами общей установленной мощностью 6 МВт, что позволяет вырабатывать до 44,4 млн. кВт·ч электроэнергии в год.

Система собственных нужд (ССН) гидроэлектростанций представляет собой сложный технологический комплекс, включающий агрегатных, блочных и общестанционных потребителей, обеспечивающих надёжную работу ГЭС. Доля электроэнергии, расходуемой на собственные нужды гидроэлектростанций, составляет 0,2–2 % от выработанной мощности, что значительно ниже аналогичных показателей для тепловых электростанций.

Бозсуйская ГЭС оснащена современным оборудованием, включая турбины и генераторы китайского производства, что обеспечивает годовую выработку электроэнергии в объёме 41,809 млн. кВт·ч. Совершенствование системы релейной защиты и внедрение автоматизированного управления существенно повысили надёжность работы станции. Доля электроэнергии, расходуемой на собственные нужды от объёма выработанной, колеблется в пределах от 0,4 до 1,31 %, что делает возможным применение солнечных панелей для покрытия собственных нужд гидроэлектростанции. Ниже приведены данные по выработке электроэнергии и её потреблению на собственные нужды Бозсуйской ГЭС за 2023–2024 годы (таблицы 1 и 2).

Как видно из анализа данных таблиц (1 и 2), доля электроэнергии, расходуемой на собственные нужды, изменяется в пределах от 0,4 до 1,31 % от общего объёма выработки. Традиционные схемы электроснабжения собственных нужд, основанные на использовании части собственной генерации, обладают рядом недостатков, таких как потери электроэнергии, зависимость от режимов работы основного оборудования и отсутствие резервирования. Современные решения предполагают применение автономных источников энергии, включая солнечные панели и накопители энергии, что позволяет снизить эксплуатационные затраты, повысить энергетическую независимость и экологическую безопасность ГЭС.

Таблица 1. Выработка электроэнергии и потребление на собственные нужды по месяцам
Таблица 1. Electricity Generation and Internal Consumption by Months

Месяцы	Выработка электроэнергии (МВт·ч)	Потребление на собственные нужды (МВт·ч)	Доля, %
Январь	1351.26	9.45	0.70
Февраль	3527.13	19.969	0.57
Март	4123.44	38.79	0.94
Апрель	4033.83	35.893	0.89
Май	3859.89	28.941	0.75
Июнь	4107.69	29.773	0.72
Июль	3739.47	32.778	0.88
Август	3753.21	33.633	0.90
Сентябрь	2884.11	28.544	0.99
Октябрь	2952.96	30.353	1.03
Ноябрь	3553.68	35.956	1.01
Декабрь	3922.59	44.483	1.13

Таблица 2. Выработка электроэнергии и потребление на собственные нужды Бозсуйской ГЭС за 2024 год
Таблица 2. Production of electric energy and consumption for personal needs of Bozsuyskoy HPP for 2024

Месяцы	Выработка электроэнергии (МВт·ч)	Потребление на собственные нужды (МВт·ч)	Доля, %
Январь	3898.74	46.539	1.19
Февраль	3716.58	48.859	1.31
Март	3524.82	38.113	1.08
Апрель	3981.84	29.536	0.74
Май	4326.81	28.473	0.66
Июнь	4245.81	27.538	0.65
Июль	4341.36	17.865	0.41
Август	4180.08	16.738	0.40
Сентябрь	2867.37	12.258	0.43

Текст.3.1.2. Ресурсы солнечной энергии в районе расположения Бозсуйской гидроэлектростанции. Республика Узбекистан обладает значительным потенциалом в области солнечной энергетики благодаря своему географическому положению и климатическим условиям. На большей части территории страны, включая район расположения Бозсуйской гидроэлектростанции, количество солнечных дней в году превышает 280–300. Средняя интенсивность солнечного излучения составляет 1700–2000 кВт·ч/м² в год. Теоретический потенциал солнечной энергии оценивается в 51 млрд. МВт, а технически доступный потенциал — порядка 179 млрд кВт·ч в год.

Климатические условия города Ташкента:

Среднегодовое количество солнечных дней:320

Среднегодовая инсоляция:1650 кВт·ч/м²

Эквивалентное число часов пиковой солнечной освещённости (Peak Sunshine Hours,PSH):4,5 ч/сут

Средняя температура воздуха в летний период: +35 °C;

Средняя температура воздуха в зимний период: +5 °C.

Сезонные особенности:

Максимальные значения инсоляции: июнь–август

Минимальные значения инсоляции: декабрь–январь; Количество дней с атмосферными осадками: 80–90 дней в год; Среднегодовая скорость ветра: 2,7 м/с.

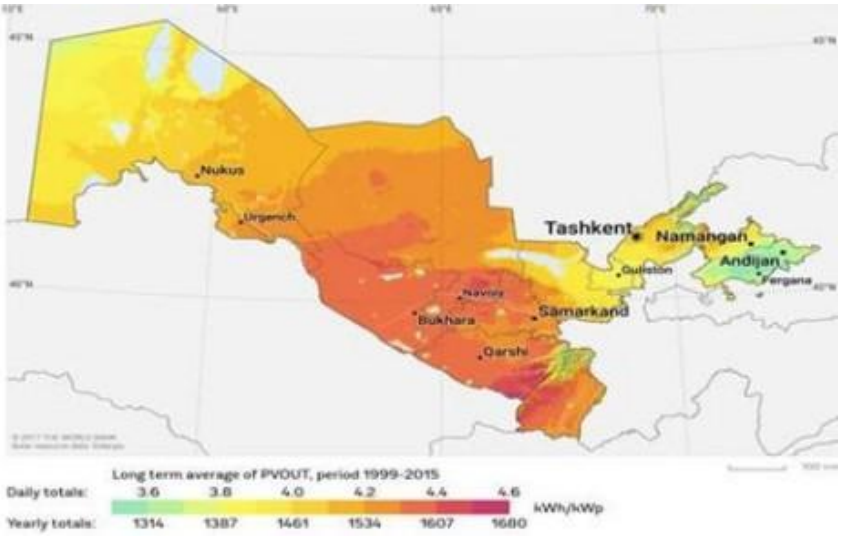

Рис. 1. Карта Республики Узбекистан с распределением интенсивности солнечного излучения по территории

Текст.При проектировании солнечной электростанции (СЭС) важным этапом является выбор площадки с максимальной солнечной освещённостью. В северном полушарии наиболее предпочтительным является размещение солнечных панелей на южной стороне кровли или конструкции, поскольку в течение всего года Солнце располагается с отклонением в южном направлении.

Кроме того, необходимо определить оптимальный угол наклона солнечных панелей таким образом, чтобы солнечные лучи падали на их поверхность максимально перпендикулярно. С учётом сезонных изменений положения Солнца — в зимний период оно располагается ближе к южному горизонту, а летом поднимается ближе к зениту — угол наклона панелей должен рассчитываться с учётом этих факторов для обеспечения максимальной эффективности работы системы.

Координаты Бозсуйской ГЭС-1:

Широта: 41˚16' N

Долгота: 69˚17' E

Высота над уровнем моря: около 500 м

Оптимальный угол наклона солнечных панелей

Базовая формула для определения оптимального угла наклона:

Угол = Широта × 0.76 + 3.1

Угол = 41 × 0.76 + 3.1 = 34.6°

Сезонная корректировка угла наклона:

Зимний период: Широта + 15° = 56°

Летний период: Широта - 15° = 26°

Компромиссный вариант для круглогодичной эксплуатации: 34–35°.

Для повышения эффективности солнечных панелей, установленных на мобильных или регулируемых конструкциях, рекомендуется изменять угол их наклона каждые 5–6 месяцев. При подготовке к зимнему периоду угол наклона следует увеличивать на 10–15°, а перед началом летнего сезона — уменьшать. В случае применения стационарной конструкции, не предусматривающей изменения угла наклона, оптимальным решением является установка солнечных панелей под углом 33–34° к поверхности земли.

3.1.3. Проектирование солнечной фотоэлектрической установки системы собственных нужд Бозсуйской ГЭС.

Исходные данные для проектирования:

Местоположение: Республика Узбекистан, г. Ташкент Объект: Бозсуйская ГЭС-1

Установленная мощность ГЭС: 6 МВт

Установленная мощность оборудования системы собственных нужд: 793,08 кВт

Годовое потребление электроэнергии: 354 796,1 кВт·ч

Потребление электроэнергии на собственные нужды приведено в таблицах (1 и 2) и на рисунках (рисунки 2 и 3, 4 и 5). Из диаграмм, представленных на этих рисунках, видно, что потребление электроэнергии на собственные нужды станции в период 2023–2024 гг. изменялось в диапазоне от 9,45 МВт·ч (январь 2023 г.) до 48,86 МВт·ч (февраль 2024 г.). В процентном отношении к объёму выработанной электроэнергии диапазон колебаний составляет от 0,40 % (август 2024 г.) до 1,31 % (февраль 2024 г.).

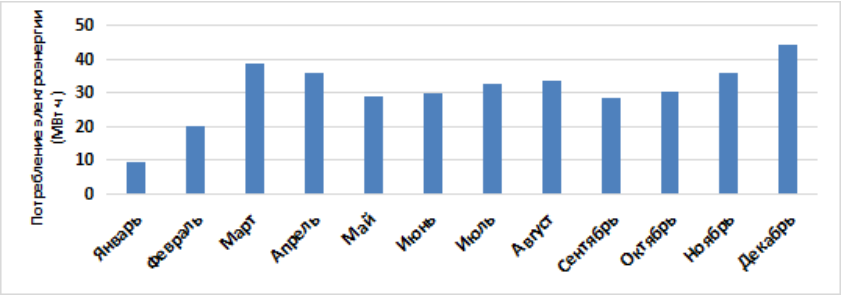

Рис. 2. Потребление электроэнергии на собственные нужды станции по месяцам за 2023 год

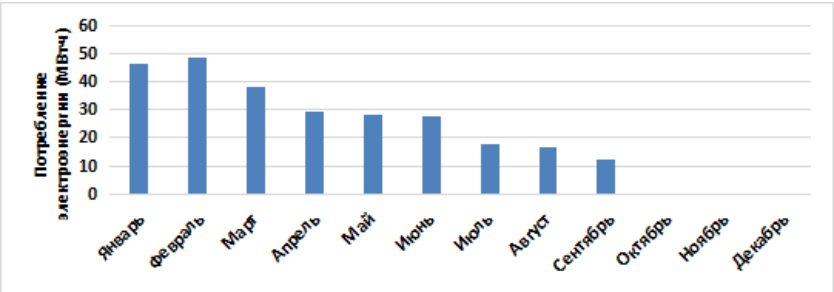

Рис. 3. Потребление электроэнергии на собственные нужды станции по месяцам за 2024 год

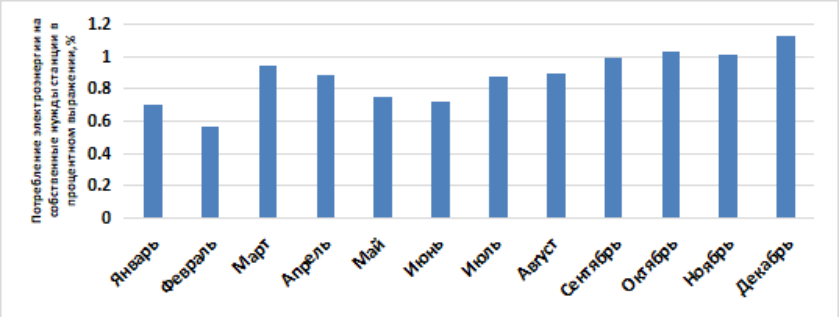

Рис. 4. Потребление электроэнергии на собственные нужды станции в процентном выражении по месяцам за 2023 год

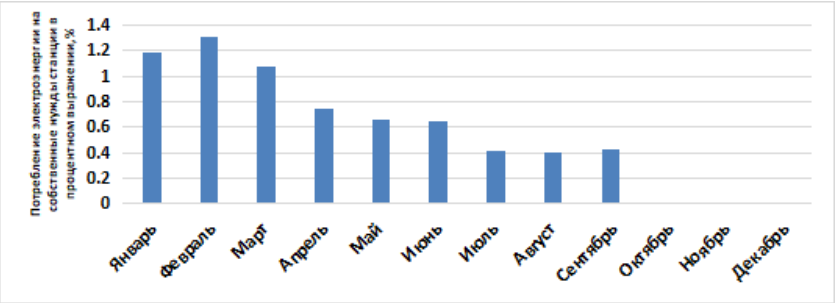

Рис. 5. Потребление электроэнергии на собственные нужды станции в процентном выражении по месяцам за 2024 год

Расчет потребности в электроэнергии.
Среднесуточное потребление электроэнергии ($E_{сут}$):

$$E_{сут} = E_{год}/365 \tag{2}$$

где: $E_{год}$ - годовое потребление электроэнергии, кВт*·ч;
365 - количество дней в году.

$E_{сут} = E_{год}/365 = 354796,1/365 = 972,04$ кВт/день

Требуемая мощность с учетом потерь ($P_{треб}$):

$$P_{треб} = \frac{E_{сут} \cdot k_{пот}}{\text{PSH}} \tag{3}$$

где: $k_{пот}$ - коэффициент, учитывающий потери (1,15);
PSH - пиковые солнечные часы (4,5 ч).

$$P_{треб} = \frac{972,04 \cdot 1,15}{4,5} = 248,41 \text{ кВт}$$

Расчет количества оборудования. Количество солнечных панелей (N):

$$N = \frac{P_{треб.} \cdot k_{зап.} \cdot 1000}{P_{панели}} \tag{4}$$

где: $k_{зап}$ - коэффициент запаса (1,2);
$P_{панели}$ - мощность одной панели, в нашем случае 550 Вт

$$N = \frac{248,41 \cdot 1,2 \cdot 1000}{550} = 541,985 \approx 545 \text{ штук}$$

Расчет площади для размещения (S):

$$S = N \cdot S_{панели} \cdot k_{расст} \tag{5}$$

где: $S_{панели}$ - площадь одной панели, м^2 ($2256 \times 1133 = 2\,556\,048$ мм$^2 \approx 2,6$ м^2);
$k_{расст}$ - коэффициент, учитывающий расстояния между рядами (1,3).

$$S = 545 \cdot 2,6 \cdot 1,3 = 1842 \text{ м}^2$$

Расчет производительности системы. Годовая выработка электроэнергии Евыр:

$$E_{выр} = P_{СЭС} \cdot \text{PSH} \cdot 365 \cdot k_{эфф} \tag{6}$$

где: $k_{эфф}$ - коэффициент эффективности системы (0,8), $P_{СЭС}$ - мощность солнечной станции ($545 \cdot 550$ Вт $= 299\,750 \approx 300$ кВт).

$$E_{выр} = 300 \cdot 4,5 \cdot 365 \cdot 0,8 = 394\,200 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Выбранное оборудование:
1) Солнечные панели: Longi Solar Hi-MO 5m LR5-72HPH-550M, эффективность 21,1% выше среднерыночных показателей (18-20%). Стоимость 1 панели: 300 долларов США (3 855 000 сум); общая стоимость 545 панелей: 163 500 долларов США (2 100 975 000 сум).

Таблица 3.

Сравнение с альтернативами.

Производитель	КПД	Гарантия	Цена за Вт	Температурный коэффициент
Longi Solar	21,1%	25 лет	$0.80	-0,35%/°C
JinkoSolar	20,7%	20 лет	$0.85	-0,39%/°C
Canadian Solar	20,4%	20 лет	$0.75	-0,41%/°C

2) Инверторы: Huawei SUN2000-50KTL-M0. Стоимость 1 инвертора: 3 500 долларов США (44 975 000 сум); общая стоимость 6 инверторов: 21 000 долларов США (269 850 000 сум).

Таблица 4.

Сравнение с альтернативами

Производитель	КПД	MPPT	Температура	Цена
Huawei	98,7%	6	-25/+60°C	$5000
SMA	98,3%	4	-25/+55°C	$5500
ABB	98,2%	5	-25/+60°C	$5300

3) Система крепления: K2 Systems D-Dome 6. Стоимость комплекта крепления: 15 долларов США (192 750 сум); общая стоимость для 545 панелей: 8 175 долларов США (105 048 750 сум).

Желтым на рисунке 6 отмечены возможные места установки солнечныхпанелей:

1. правый берег подводящего канала площадь 2900 м^2 (1115 штук панелей)
2. крыша нового здания ГЭС-1 площадь 670 м^2 (257 штук панелей)
3. надземная часть отводящих трубопроводов площадь 415 м^2 (159 штук панелей)
4. крыша здания АПК площадь 330 м^2 (126 штук панелей)

Рис. 6. Возможные места установки панелей.

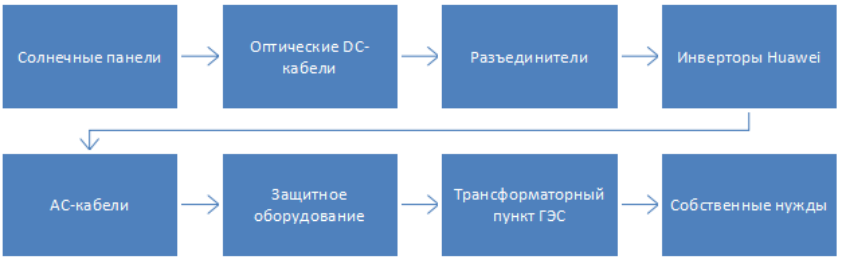

Рис. 7. Последовательность установки оборудования.

Предложенная система учитывает все основные виды потерь, включая затенение, температурные и эксплуатационные факторы, с общими потерями на уровне 20%. Использование коэффициентов запаса и эффективности обеспечивает надежность расчетов и стабильную работу СЭС.

Оценка экономической эффективности солнечной фотоэлектрической установки

При оценке экономической эффективности предлагаемого решения была использована методика, представленная в работе [8], с учётом особенностей функционирования системы собственных нужд и гидроэлектростанции в целом. Оценка экономической эффективности предлагаемого решения в виде фотоэлектрической установки для покрытия собственных нужд станции будет проведена для двух вариантов:

Вариант 1. Оценка экономической эффективности фотоэлектрической установки как элемента энергосистемы. При покрытии собственных нужд гидроэлектростанции за счёт солнечной энергии увеличивается объём электроэнергии, отпускаемой гидроэлектростанцией в энергосистему. В случае же покрытия собственных нужд за счёт электроэнергии, вырабатываемой самой станцией, энергосистема недополучает часть электроэнергии, которую в дальнейшем вынуждены вырабатывать другие электростанции. Поскольку доля тепловых электростанций в структуре энергосистемы превышает 80 %, в качестве альтернативного источника электроэнергии целесообразно принять условную комбинированную электростанцию, обеспечивающую выработку 80 % электроэнергии за счёт органического топлива и оставшихся 20 % — за счёт гидроэнергетики и других возобновляемых источников энергии.

Вариант 2. Оценка экономической эффективности фотоэлектрической установки как элемента гидроэлектростанции. В данном случае рассматривается работа гидроэлектростанции в автономном (изолированном) режиме, то есть без участия в энергосистеме. Соответственно, в качестве альтернативной электростанции принимается гидроэлектростанция. В общем виде экономическая эффективность определяется разностью между доходами и затратами. Далее рассмотрим экономические характеристики фотоэлектрической электростанции в соответствии с методикой, изложенной в работе [7]:

Капитальные вложения в солнечную электростанцию ($K_{СЭС}$):

$$K_{СЭС} = N_{СЭС} * C_{СЭС} \quad (7)$$

или при наличии аккумуляторной батареи:

$$K_{СЭС} = N_{АК} * C_{АК} + N_{СЭС} * C_{СЭС} \quad (8)$$

где: $C_{СЭС}$ – суммарная удельная стоимость фотоэлектрической установки, долл./кВт.

В таблице 5 представлены результаты определения стоимости фотоэлектрической установки для электроснабжения системы собственных нужд Бозсуйской ГЭС.

Таблица 5.

Годовая экономия топливных ресурсов $D_{топл}$:

$$D_{топл} = \gamma_{топл} * E_{СЭС}, \text{ [кг условного топлива]} \quad (9)$$

Стоимость оборудования солнечной фотоэлектрической установки.

Наименование	Тип	Цена	Количество	Общая цена
Солнечные панели	Longi Solar Hi-MO 5m LR5-72HPH-500M	$300	545 шт.	$163 500
Инверторы	Huawei SUN2000-50KTL-M0	$3 500	6 шт.	$21 000
Система крепления	K2 Systems D-Dome 6	$15	545 компл.	$8 175
Кабельная продукция Солнечный кабель Силовой кабель AC	PV1-F ВВГнг(А)-LS		3000 м 200 м	$5 000 $4 000
Защитное оборудование AC Автоматические выключатели Устройства защитного отключения DC: Предохранители Разъединители	Schneider Electric NSX400N Schneider Electric Acti 9 ETI 10x38 gPV 15A ABB OTDC32F3	$400 $70	6 компл. 60 компл.	$2 400 $4 200
			Общее:	**$208 275**

где: $\gamma_{топл}$ — удельная экономия топлива на 1 кВт·ч электроэнергии, кг у.т./(кВт·ч) (для энергосистемы Республики Узбекистан $\gamma_{топл} = 314 - 375$ г/(кВт·ч)).

Экономия топлива $E_{топл}$:

$$E_{топл} = D_{топл} * \beta_{топл}, \text{ [долл.]} \quad (10)$$

где: $\beta_{топл}$ — стоимость 1 кг условного топлива, сум/кг у.т. (для расчётов принимаем $\beta_{топл} = 60$ долл./т. условного топлива).

Годовые эксплуатационные затраты фотоэлектрической установки $ЭЗ_{СЭС}$:

$$ЭЗ_{СЭС} = C_{амортизации} + C_{ремонт} + C_{зарплат} + C_{другие}, \quad (11)$$

где: $C_{амортизации}$ — амортизационные отчисления по солнечной фотоэлектрической установке СЭС:

$$C_{амортизации} = 0.05 \cdot K_{СЭС} \quad (12)$$

$C_{ремонт}$ — затраты на техническое обслуживание и ремонт:

$$C_{ремонт} = 0.18 \cdot C_{амортизации} = 0.18 \cdot 0.05 K_{СЭС} = 0.009 K_{СЭС} \quad (13)$$

$C_{зарплат}$ — заработная плата обслуживающего персонала:

$$C_{зарплат} = \Delta C_{зарплат} \cdot n_{персонала} \quad (14)$$

где: n_{staff} — количество персонала; $\Delta C_{зарплат}$ — зарплата одного работника;
Прочие расходы (накладные расходы) $C_{другие}$:

$$C_{другие} = 0.15(C_{амортизации} + C_{ремонт} + C_{ремонт}) = 0.15(0.059 K_{СЭС} + C_{зарплат}) \quad (15)$$

$$C_{СЭС} = 0.06785 K_{СЭС} + 1.15 C_{зарплат} \quad (16)$$

Себестоимость электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрической установкой $C_{СЭС}$ определяется следующим соотношением:

$$СЭ_{СЭС} = C_{СЭС} / Э \quad (17)$$

Цена электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрической установкой для собственного потребления ФЭУ $P_{СЭС}$:

$$P_{СЭС} = {}_{СЭС} \cdot t_{ээ}, \quad [\$] \quad (18)$$

где: $t_{ээ}$ — тариф на электроэнергию, сум/(кВт·ч).

Годовой экономический эффект (экономическая эффективность) фотоэлектрической установки (СЭС) определяется следующим образом:

$$_{СЭС} = P_{СЭС} + E_{топл} + \Delta EM - C_{СЭС} - 0.15 \cdot K_{СЭС} \quad (19)$$

где: ΔEM — эффект от снижения выбросов парниковых газов.

Эффект снижения выбросов парниковых газов за счёт применения фотоэлектрической установки (СЭС):

$$\Delta EM = EM \cdot \beta_{CO_2} \quad (20)$$

где: β_{CO_2} — годовые затраты на природоохранные мероприятия по снижению выбросов CO_2, принимаемые в размере $15 \ldots 20$ \$/тон;
EM — годовой объём выбросов CO_2 т/год, который для каждого вида топлива (для установок на сжигании топлива) определяется по следующей формуле:

$$EM = M*K_1*CV_{топл}*K_2 \cdot 44/12 \quad (21)$$

где: М фактический годовой расход топлива:

$$M = \gamma_{топл}*E_{потреб}, \text{ [тон/год]} \quad (22)$$

где: $\gamma_{топл}$ — удельный расход топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии.

Срок окупаемости капитальных вложений в солнечную фотоэлектрическую электростанцию определяется следующим образом:

$$T_{оккуп} = \frac{K_{СЭС}}{E_{СЭС}} \quad \text{[год]} \quad (23)$$

Рентабельность капитальных вложений R в фотоэлектрическую установку (ФЭУ) определяется следующим образом:

$$R = \frac{K_{СЭС}}{E_{СЭС}} \quad (24)$$

В результате расчётов по вышеуказанным формулам были определены следующие технико-экономические показатели:

Вариант 1:

- стоимость электроэнергии, вырабатываемой ФЭУ, — 27 600 долл./год (358 млн сум/год);
- экономия топливных ресурсов — 120 т у.т. (условного топлива);
- денежный доход от сэкономленного топлива — 7 200 долл./год (93 378 795 сум);
- сокращение годовых выбросов CO_2 — 220 т/год;
- экологический эффект — **4 400 долл./год** (57 млн сум/год);
- экономическая эффективность фотоэлектрической электростанции — 25 000–28 000 долл./год (323–3 620 млн сум/год);
- срок окупаемости — 7,46–8,32 года;
- рентабельность — 12,1–13,4 %.

Вариант 2:

- экономическая эффективность ФЭУ — 15 269 долл./год (198 млн сум/год);
- срок окупаемости — 13,7 года;
- рентабельность — 7,3 %.

Обсуждение:

1. Проектирование солнечной электростанции для покрытия собственных нужд Бозсуйской ГЭС-1 показало высокую целесообразность внедрения солнечной электростанции установленной мощностью 300 кВт. Выполненные расчёты показали, что годовая выработка

электроэнергии системой составит 394 200 кВт·ч, что превышает годовое потребление электроэнергии на собственные нужды гидроэлектростанции (354 796,1 кВт·ч). Таким образом, солнечная электростанция полностью покрывает потребности объекта, обеспечивая дополнительный резерв электроэнергии.

2. Расчёт срока окупаемости и экологического эффекта от применения солнечных электростанций для покрытия собственных нужд гидроэлектростанций показал, что экономические показатели оказываются в 1,5 – 2 раза выше при работе гидроэлектростанций в составе энергосистемы, где основная выработка электроэнергии приходится на тепловые электростанции (вариант 1), по сравнению с режимом автономной (изолированной) работы гидроэлектростанции (вариант 2).

В данном случае годовой экономический эффект от использования солнечной электростанции составляет 25 000 – 28 000 долл. США в год, что обеспечивает срок окупаемости проекта в пределах 7,46 – 8,32 года при объёме капитальных вложений 2 676 333 750 сум, что эквивалентно 208 275 долл. США).

3. Внедрение данной системы позволит снизить энергетические затраты, повысить энергетическую независимость объекта и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду. Активное использование солнечных технологий для электроснабжения собственных нужд гидроэлектростанций способствует повышению их энергетической эффективности и устойчивости функционирования.

Заключение

Этот раздел не является обязательным, но может быть добавлен к рукописи, если обсуждение является особенно длинным или сложным.

Вклад авторов

"Концептуализация, Кан Э.К. и Абдураимов А.Ш; методология, Кан Э.К; валидация, Абдураимов А.Ш., Романчёв Д.А. и Арифбаев Б.Ж.; формальный анализ, Абдураимов А.Ш.; исследование, Абдураимов А.Ш.; ресурсы, Арифбаев Б.Ж.; кураторство данных, Кан Э.К.; написание оригинального текста, Абдураимов А,Ш,; написание и редактирование, Кан Э.К.; визуализация, Романчёв Д.А."

Authors' contribution

"Conceptualization, E. Kan and A. Abduraimov; methodology, E. Kan; validation, A. Abduraimov, D. Romanchov and B. Arifbayev; formal analysis, A. Abduraimov; investigation, A. Abduraimov; resources, B. Arifbayev; data curation, E. Kan; writing—original draft preparation, A. Abduraimov; writing—review and editing, E. Kan; visualization, D. Romanchov.

Источник финансирования

«Это исследование не получало внешнего финансирования»

Funding source

"This research received no external funding"

Соответствие принципам этики

В этом разделе следует добавить заявление об одобрении институционального обзорного комитета и номер одобрения, если это имеет отношение к вашему исследованию. Вы можете выбрать исключить это заявление, если исследование не требовало этического одобрения. Обратите внимание, что редакционная коллегия может запросить у вас дополнительную информацию. Пожалуйста, добавьте: «Исследование проводилось в соответствии с Декларацией Хельсинки и было одобрено Институциональным обзорным комитетом (или Этическим комитетом) ИМЯ ИНСТИТУТА (код протокола XXX и дата одобрения).» для исследований, включающих людей. ИЛИ «Протокол исследования на животных был одобрен Институциональным обзорным комитетом (или Этическим комитетом) ИМЯ ИНСТИТУТА (код протокола XXX и дата одобрения).» для исследований, включающих животных. ИЛИ «Этический обзор и одобрение были отменены для этого исследования из-за ПРИЧИНА (пожалуйста, предоставьте

подробное обоснование).» ИЛИ «Не применимо» для исследований, не включающих людей или животных.

Ethics approval

In this section, you should add the Institutional Review Board Statement and approval number, if relevant to your study. You might choose to exclude this statement if the study did not require ethical approval. Please note that the Editorial Office might ask you for further information. Please add "The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board (or Ethics Committee) of NAME OF INSTITUTE (protocol code XXX and date of approval)." for studies involving humans. OR "The animal study protocol was approved by the Institutional Review Board (or Ethics Committee) of NAME OF INSTITUTE (protocol code XXX and date of approval)." for studies involving animals. OR "Ethical review and approval were waived for this study due to REASON (please provide a detailed justification)." OR "Not applicable" for studies not involving humans or animals

Информированное согласие на публикацию

Любая научная статья, описывающая исследование, в котором участвуют люди, должна содержать следующее заявление. Пожалуйста, добавьте: «Информированное согласие было получено от всех участников исследования.» ИЛИ «Согласие пациентов было отменено из-за ПРИЧИНА (пожалуйста, предоставьте подробное обоснование).» ИЛИ «Не применимо» для исследований, не включающих людей. Вы также можете выбрать исключение этого заявления, если исследование не включало людей. Письменное информированное согласие на публикацию должно быть получено от участвующих пациентов, которые могут быть идентифицированы (включая самих пациентов). Пожалуйста, укажите «Письменное информированное согласие было получено от пациента(ов) для публикации данной статьи», если это применимо.

Consent for publication

Any research article describing a study involving humans should contain this statement. Please add "Informed consent was obtained from all subjects involved in the study." OR "Patient consent was waived due to REASON (please provide a detailed justification)." OR "Not applicable" for studies not involving humans. You might also choose to exclude this statement if the study did not involve humans. Written informed consent for i-edu must be obtained from participating patients who can be identified (including by the patients themselves). Please state "Written informed consent has been obtained from the patient(s) to publish this paper" if applicable.

Заявление о доступности данных

Мы призываем всех авторов статей, опубликованных в журнале, делиться своими исследовательскими данными. В этом разделе, пожалуйста, укажите, где можно найти данные, поддерживающие представленные результаты, включая ссылки на общедоступные архивированные наборы данных, которые были проанализированы или сгенерированы в ходе исследования. Если новые данные не были созданы или данные недоступны из-за конфиденциальности или этических ограничений, необходимо предоставить соответствующее заявление.

Data Availability Statement

We encourage all authors of articles published in the journal to share their research data. In this section, please specify where the data supporting the reported results can be found, including links to publicly archived datasets analyzed or generated during the study. If no new data were created or if data is unavailable due to privacy or ethical restrictions, a statement is still required.

Благодарности

In this section you can acknowledge any support given which is not covered by the author contribution or funding sections. This may include administrative and technical support, or donations in kind (e.g., materials used for experiments).

Acknowledgments

In this section you can acknowledge any support given which is not covered by the author contribution or funding sections. This may include administrative and technical support, or donations in kind (e.g., materials used for experiments).

Конфликт интересов

«Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов». «Спонсоры не участвовали в разработке исследования; в сборе, анализе или интерпретации данных; в написании рукописи или в принятии решения о публикации результатов».

Conflict of interest

Declare conflicts of interest or state “The authors declare no conflicts of interest.” Authors must identify and declare any personal circumstances or interest that may be perceived as inappropriately influencing the representation or interpretation of reported research results. Any role of the funders in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results must be declared in this section. If there is no role, please state “The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results”.

Литература

[1] Heshmati, A., 2020. Energy economics and policy in developed countries (MDPI, Basel, Switzerland,2020).

[2] Ikramov, N., Majidov, T., Kan, E., Mukhammadjonov, A., 2020. Monitoring System for electricity consumption at pumping stations, in CONMECHYDRO-2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 883 012101 doi:10.1088/1757-899X/1/012101

[3] Kan, E., Mukhammadiev, M., Dzhuraev, K., Abduaziz Uulu, A., 2023. Assessment of economic efficiency of combined power plants based on renewable energies, in E3S Web of Conferences, 401, 04005, DOI: 10.1051/e3sconf/202340104005.

[4] Kan, E., Mukhammadiev, M., Dzhuraev, K., Abduaziz Uulu, A., Shadibekova, F., 2023. Methodology for determining technical, economic and environmental performance of combined power plants, in E3S Web of Conferences, 401, 04036, DOI: 10.1051/e3sconf/202340104036.

[5] Kan, E., Mukhammadiev, M., Li, A.,Aralov, Sh., 2021. Methodology for assessing the efficiency of water jet pumps in auxiliary systems of irrigation pumping stations. In E3S Web of Conferences 304,01003, DOI 10.1051/e3sconf/202130401003.

[6] Kan, E., Nasrulin, A., 2021. Technical and Economic Indicators of Reconstructed Irrigation Pumping Stations, In 3rd International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, CONMECHYDRO AS, AIP Conference Proceedings, 2612, 020010, doi 10.1063/5.0131854.

[7] Nosirov, F., Juraev, A., Karabaev, I., Kerimzatov, N., 2023. Economic calculation of a photoelectric station for degradation processes. AIP Conference Proceedings 2552, 050035, (AIP Publishing), https://doi.org/10.1063/5.0130642.

[8] Qi, L., Jiang, M., Li, Yu., Zhang, Z., Yan, J., 2021. Techno-economic assessment of photovoltaic power generation mounted on cooling towers, Energy Conversion and Management, 235, 113907. (Elsevier Ltd.) https://doi.org/10.1016/j.enconman. 2021.113907.

[9] Urishev, B., Nosirov, F., 2023. Hydraulic Energy Storage of Wind Power Plants J. Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT, (Anhalt University of Applied Sciences) Volume 11, Issue 1, pp.267-272, doi: 10.25673/101947.

[10] Menendez, J., Loredo J., 2019. Economic feasibility of developing large scale solar photovoltaic power plants in Spain, in E3S Web of Conferences 122,02004.

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельным лицам.Авторы и участники, а Журнал и редакторы. Журнал и редакторы не несут ответственности за любой ущерб, нанесенныйлюдей или имущество, возникшее в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.

Disclaimer of liability/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications belong exclusively to individuals.The authors and participants, and the Journal and the editors. The journal and the editors are not responsible for any damage caused to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products mentioned in the content.