

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В УЗБЕКИСТАНЕ С УЧЁТОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Юсупов Д.Т., Мирзалиев У.И.

Национальный научно-исследовательский институт возобновляемых источников энергии

E-mail: umirzaliyev@mail.ru

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17503884>

Аннотация: В условиях роста доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и дефицита регулирующих мощностей в энергосистеме Узбекистана гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) рассматриваются как стратегическое решение для повышения надёжности и устойчивости электроснабжения. Целью настоящего исследования является оценка технико-экономических, экологических и географических предпосылок внедрения ГАЭС в аридных условиях Узбекистана.

Результаты показывают, что ГАЭС мощностью 400-800 МВт с КПД 72-85 % и сроком службы до 80 лет обеспечивают минимальную стоимость хранения (0,05-0,13 USD/кВт·ч), сокращают выбросы CO₂ до 12 млн тонн к 2035 году и позволяют экономить до 1,6 млрд м³ природного газа ежегодно.

Выводы подтверждают целесообразность включения ГАЭС в национальную энергетическую стратегию как ключевого элемента низкоуглеродного перехода и повышения энергетической безопасности Узбекистана. Предложена адаптированная модель расчёта эффективности ГАЭС с учётом испаряемости, сейсмических рисков и водного дефицита.

Ключевые слова: гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС), Узбекистан, энергосистема, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), накопление энергии, экономическая эффективность, водные ресурсы, аридный климат, выбросы CO₂.

ASSESSING THE POTENTIAL OF PUMPED STORAGE HYDROELECTRIC POWER PLANTS IN UZBEKISTAN, TAKING INTO ACCOUNT ENERGY EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL FACTORS

Yusupov D.T., Mirzaliyev U.I.

National Research Institute of Renewable Energy Sources

E-mail: umirzaliyev@mail.ru

Abstract: With the growing share of renewable energy sources (RES) and a shortage of control capacity in Uzbekistan's power grid, pumped storage hydroelectric power plants (PSHPPs) are considered a strategic solution for increasing the reliability and sustainability of electricity supply. The objective of this study is to assess the technical, economic, environmental, and geographic prerequisites for implementing PSHPPs in Uzbekistan's arid environment.

The results show that PSHPPs with a capacity of 400-800 MW, an efficiency of 72-85%, and a service life of up to 80 years offer minimal storage costs (USD 0.05-0.13/kWh), reduce CO₂ emissions by up to 12 million tons by 2035, and save up to 1.6 billion cubic meters of natural gas annually.

The findings confirm the feasibility of including pumped storage power plants in the national energy strategy as a key element of the low-carbon transition and improving Uzbekistan's energy security. An adapted model for calculating pumped storage power plant efficiency is proposed, taking into account evaporation, seismic risks, and water shortages.

Keywords: pumped-storage hydropower plant (PSHPP), Uzbekistan, energy system, renewable energy sources (RES), energy storage, economic efficiency, water resources, arid climate, CO₂ emissions.

O‘ZBEKISTONDA ENERGIYA SAMARADORLIGI VA ATROF-MUHIT OMILLARINI HISOBGA OLGAN HOLDA GIDROAKKUMULYATSIYALASH ELEKTR STANSIYASI SALOHIYATINI BAHOLASH

Yusupov D.T., Mirzaliyev U.I.

Qayta tiklanuvchi energiya manbalari milliy ilmiy-tadqiqot instituti
umirzaliyev@mail.ru

Anotatsiya: Qayta tiklanadigan energiya manbalarining (QTEM) ulushi ortib borayotgani va O‘zbekiston elektr tarmo‘ida boshqaruv quvvatining yetishmasligi bilan gidroakkumulyatsiyalash elektr stansiyasi (GAES) elektr ta‘minotining ishonchliligi va barqarorligini oshirish uchun strategik yechim hisoblanadi. Ushbu tadqiqotning maqsadi O‘zbekistonning qurg‘oqchil sharoitlarida GAESlarni joriy etishning texnik, iqtisodiy, ekologik va geografik shart-sharoitlarini baholashdir.

Natijalar shuni ko‘rsatadiki, 400-800 MVt quvvatga ega, samaradorlik 72-85% va xizmat muddati 80 yilgacha bo‘lgan GAESlar minimal saqlash xarajatlarini (0,05-0,13 AQSH dollari/kVt/soat) tashkil qiladi, 2035-yilga kelib CO₂ chiqindilarini 12 million tonnagacha kamaytiradi va yiliga 1,6 milliard kub metrgacha tabiiy gazni tejaydi.

GAESlarning past uglerodli o‘tishga va O‘zbekiston energetika xavfsizligini oshirishning asosiy elementi sifatida milliy energetika strategiyasiga kiritish maqsadga muvofiqligini tasdiqlaydi. Bug‘lanish, seysmik xavflar va suv tanqisligini hisobga olgan holda GAES samaradorligini hisoblashning moslashtirilgan modeli taklif etildi.

Kalit so‘zlar: gidroakkumulyatsiyalash elektr stansiyasi (GAES), O‘zbekiston, energetika tizimi, qayta tiklanuvchi energiya manbalari (QTEM), energiyani saqlash, iqtisodiy samaradorlik, suv resurslari, qurg‘oqchil iqlim, CO₂ chiqindilari.

ВВЕДЕНИЕ

Узбекистан обладает значительным потенциалом гидроэнергетических ресурсов, оцениваемым в 27,4 млрд кВт·ч/год технически реализуемой мощности. Согласно Энергетической стратегии Республики Узбекистан до 2030 года, планируется ввод 7 ГВт солнечных и 5 ГВт ветровых мощностей. При этом высокая доля переменных ВИЭ создаёт новые вызовы для стабильности энергосистемы: колебания выработки, ночные провалы генерации и дневные пики избыточного производства электроэнергии [1,2].

ГАЭС рассматриваются как стратегическое решение этой проблемы, поскольку они позволяют накапливать энергию в периоды низкого спроса и использовать её в часы пик, обеспечивая баланс сети без привлечения дополнительной генерации.

Однако проблема заключается не только в выборе технологии, но и в её адаптации к региональным особенностям. В Узбекистане наблюдается дефицит водных ресурсов (снижение среднегодового стока на 18 % с 2000 года), высокая сейсмическая активность (до 9 баллов) и экстремальные летние температуры (до +45° C), снижающие эффективность гидромеханического оборудования. [3,4].

Кроме того, требуется комплексное моделирование водного и энергетического баланса в условиях аридного климата, что ранее почти не исследовалось.

Актуальность темы подтверждается международным опытом: по данным IRENA (2023), в странах, где доля ВИЭ превышает 30 %, именно ГАЭС обеспечивают до 40 % объёма балансирующих мощностей. Однако адаптация этих технологий к условиям Центральной Азии требует дополнительных исследований и пилотных проектов. По прогнозам Международного энергетического агентства (IEA, 2024), мировой объём хранения электроэнергии на базе гидроаккумуляции к 2030 году превысит 240 ГВт, что составит ~90 % от всех систем накопления энергии [6].

Цель исследования - провести комплексный анализ перспектив внедрения ГАЭС в Узбекистане, определить технико-экономические, экологические и географические предпосылки их реализации и сформировать адаптированную методологию оценки эффективности в условиях аридного климата.

Научная новизна работы заключается в разработке адаптированной модели оценки эффективности ГАЭС с учётом испарения и сейсмостойкости, проведении системного сравнения с альтернативными накопителями энергии, а также в прогнозе влияния внедрения ГАЭС на сокращение выбросов CO₂ и повышение устойчивости энергосистемы Узбекистана до 2035 года.

МЕТОДОЛОГИЯ

Методология исследования основана на сочетании аналитического, сравнительного и прогнозного подходов. В её основу положены данные IRENA, IEA, Всемирного банка, REN21, а также отчёты Министерства энергетики Республики Узбекистан и национальных научных институтов.

Основные этапы исследования

1. Сбор и анализ статистических данных по энергетической структуре и водным ресурсам Республики Узбекистан.
2. Изучение международного опыта внедрения ГАЭС в условиях схожего климата:
 - Испания – ГАЭС «La Muela II» (850 МВт), работающая в засушливом регионе Валенсии;
 - Израиль – проект «Gilboa Pumped Storage» (300 МВт), где применены закрытые циклы циркуляции воды;
 - Индия – ГАЭС «Tehri II» (1000 МВт), интегрированная в каскад ГЭС;
 - Китай – ГАЭС «Guangzhou» (2400 МВт), обеспечивающая баланс крупнейшей солнечной сети Азии [10,13].
3. Топографический и гидрологический анализ потенциальных площадок в горах Западного Тянь-Шаня и Гиссарского хребта (перепады высот 400-900 м, сток 8,7 км³) [3,8].
4. Экономико-энергетическое моделирование - расчёт КПД, себестоимости хранения (в \$/кВт·ч) и срока окупаемости (по методике NPV и IRR).
5. Оценка экологических и социальных эффектов - анализ влияния на гидрологический режим, биоразнообразие и занятость населения.

ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе рассматриваются существующие подходы к реализации гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) в мире и анализируются возможности их адаптации к условиям Узбекистана.

ГАЭС позволяют:

- Сглаживать пиковые нагрузки. ГАЭС выполняют функцию сглаживания пиковых нагрузок. Они накапливают излишнюю электроэнергию в часы низкого спроса, закачивая

воду в верхний резервуар, а затем возвращают ее обратно в энергосистему, вырабатывая электроэнергию в периоды повышенного потребления;

– Компенсировать нестабильность ВИЭ. Когда солнечные панели или ветряные мельницы вырабатывают **больше энергии, чем нужно** (например, в полдень при низком потреблении), ГАЭС использует этот избыток, чтобы **закачать воду** из нижнего водоема в верхний. Энергия переходит в форму **потенциальной энергии воды** затем, когда выработка ВИЭ падает (вечером, ночью, в безветренную погоду), вода из верхнего водоема **сбрасывается через турбину** в нижний. Турбина крутит генератор, и **сеть получает электроэнергию** в нужный момент;

– Быстрая реакция. ГАЭС может включиться за 30-90 секунд, в отличие от тепловых станций, которым требуется 20-40 минут. У ГАЭС энергия уже «запасена» в виде воды в верхнем бассейне. Для выдачи мощности достаточно открыть водяной поток через гидротурбину-турбина и генератор мгновенно получают механическую нагрузку и начинают вырабатывать электричество. А в ТЭС необходимо нагреть котел или довести до рабочего давления паровую систему что занимает десятки минут [7].

Глобальные тенденции развития гидроаккумуляции: По данным **IRENA (2024)**, мировой совокупный объём гидроаккумулирующих мощностей составляет около **180 ГВт**, из которых более 60 % сосредоточено в странах Азии и Европы. Наиболее активно технологии развиваются в Китае, Японии, Швейцарии, Испании и США.

Ключевые тренды в развитии гидроаккумуляции включают масштабное внедрение ГАЭС в энергосистемах с высокой долей ВИЭ, переход к замкнутым циклам водооборота (Closed-Loop PSH) для минимизации потерь воды, а также применение цифровых систем управления (SCADA и AI-оптимизация) для синхронизации с возобновляемыми источниками и прогнозирования нагрузок. Так, Китай реализует программу «Hydro 2030», предусматривающую ввод **60 ГВт новых ГАЭС**, включая крупнейшие объекты в провинциях Гуандун и Хубэй. Япония, обладая ограниченными водными ресурсами, развивает компактные подземные станции («Okutataragi PSH» - 1920 МВт), минимизирующие воздействие на ландшафт.

В Европе ГАЭС играют роль системных накопителей: в Австрии и Норвегии они интегрированы с солнечными и ветровыми фермами соседних стран, обеспечивая до 30 % суточного баланса ЕС [6].

Региональные особенности и адаптация технологии: Применение гидроаккумуляции в Центральной Азии имеет ряд особенностей. Во-первых, горно-долинный рельеф региона даёт благоприятные условия для создания перепадов высот. В Узбекистане, как и в Киргизии и Таджикистане, существует потенциал для строительства небольших и средних ГАЭС (от 100 до 800 МВт).

Во-вторых, ограниченность водных ресурсов делает необходимым использование замкнутых систем циркуляции воды. В отличие от классических ГАЭС, использующих естественные водоёмы, такие станции не требуют постоянного подпиточного притока, что позволяет их строить даже в районах с низким стоком.

Третьей важной особенностью является высокая сейсмическая активность территорий. Для минимизации рисков целесообразно применять **сейсмостойкие плотины комбинированного типа (бетонно-насыпные)**, успешно апробированные в Японии и Иране.

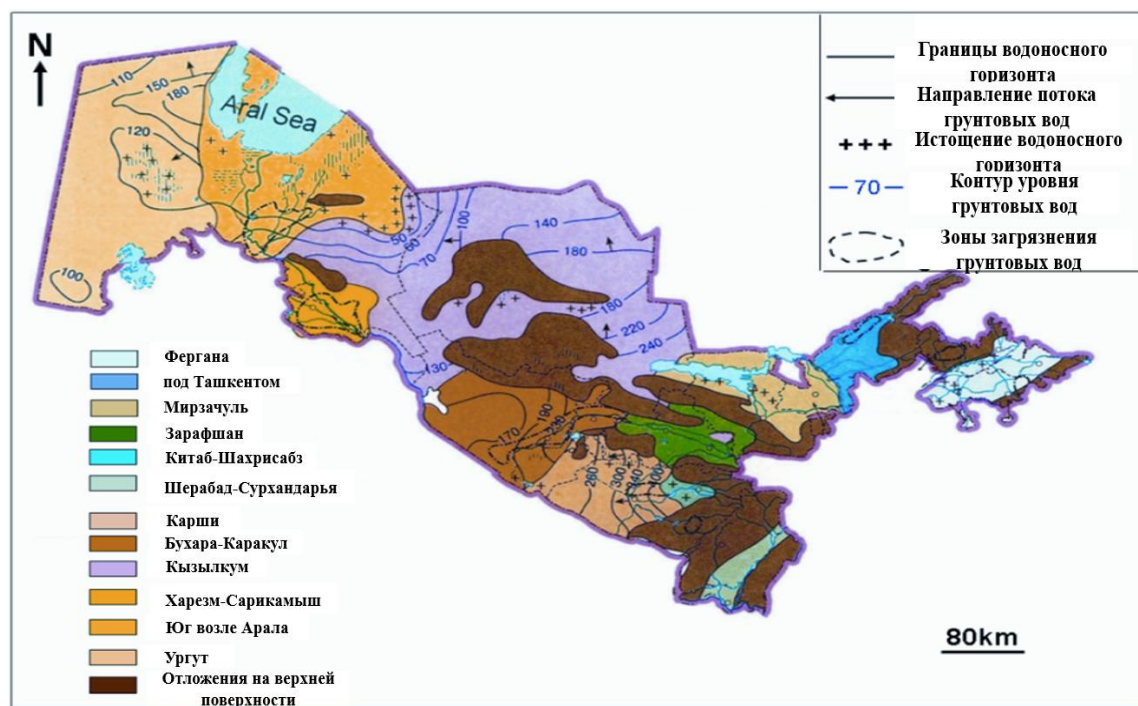


Рисунок 1. Карта потенциальных площадок для ГАЭС в Узбекистане [11].

Кроме того, внедрение ГАЭС может стимулировать развитие смежных отраслей: машиностроения, кабельной промышленности, строительства, что создаёт мультипликативный эффект для национальной экономики.

Социально-экономические эффекты: Строительство и эксплуатация ГАЭС оказывает комплексное влияние на социально-экономическую ситуацию:

1. **Создание рабочих мест.** На этапе строительства одной станции мощностью 500 МВт требуется от 1500 до 3000 работников; эксплуатация – 200-400 постоянных специалистов.

2. **Развитие инфраструктуры.** В районах размещения ГАЭС создаются новые дороги, линии электропередачи, водопроводы, что повышает инвестиционную привлекательность территорий.

3. **Рост локальной экономики.** Каждый 1 млрд USD инвестиций в ГАЭС увеличивает ВВП страны на 0,1-0,2 % в период строительства, по данным Всемирного банка.

4. **Снижение социальной напряжённости.** Обеспечение надёжного электроснабжения в труднодоступных горных районах способствует росту качества жизни и уменьшению миграции населения.

Экологические аспекты: Хотя строительство ГАЭС оказывает воздействие на окружающую среду, при правильном проектировании оно может быть минимизировано.

Основные экологические вызовы включают:

– Изменение гидрологического режима рек. Строительство и эксплуатация ГАЭС могут привести к изменению естественного графика стока рек. Суточные и сезонные колебания уровня воды из-за работы насосно-турбинных агрегатов могут повлиять на скорость течения, температуру воды и содержание кислорода, что сказывается на экосистемах. Особенно чувствительными оказываются нерестовые зоны рыб и прибрежная флора [10];

– Затопление территорий. При создании верхнего и/или нижнего водохранилища возможно затопление значительных площадей, включая сельхозугодья, лесные массивы и иногда населённые пункты. Это требует переселения жителей, компенсации за потерю земли и адаптации местной экономики. Масштаб затопления зависит от рельефа и проектных решений – в горных районах он минимален, но в равнинных может быть существенным [6];

– Воздействие на биоразнообразие. ГАЭС могут фрагментировать водные экосистемы, нарушая пути миграции рыб и изменяя условия обитания водной и прибрежной фауны. Кроме того, изменение температурного и химического состава воды может привести к исчезновению или вытеснению некоторых видов. Для смягчения этих эффектов применяются рыбопропускные устройства, экологические попуски воды и рекультивация береговых зон [7];

Для минимизации указанных экологических воздействий применяются следующие инженерно-экологические меры:

– **Проектирование рыбопропускных сооружений и экологических попусков воды.** Специальные каналы, лотки или рыбные лестницы обеспечивают возможность миграции рыб вверх и вниз по реке, несмотря на наличие плотины. Экологические попуски воды позволяют сохранять минимально необходимый сток в нижнем течении, предотвращая пересыхание русел и поддерживая естественные условия для водной фауны;

– **Рекультивация и озеленение береговой зоны.** После строительства водохранилищ проводится восстановление нарушенных участков берегов: высаживаются местные виды растений, укрепляются склоны и создаются защитные зеленые полосы. Это помогает предотвратить эрозию почв, улучшает микроклимат и возвращает среду обитания местным видам животных и птиц;

– **Мониторинг биоты в период эксплуатации станции.** Проводится регулярное наблюдение за состоянием водных и прибрежных экосистем — численностью и разнообразием видов, уровнем загрязнений и биологических нарушений. Такие наблюдения позволяют оперативно выявлять негативные изменения и вносить коррективы в режим работы станции для минимизации ущерба окружающей среде [18];

В ряде стран (Швейцария, Канада, Южная Корея) применяются инновационные технологии снижения испарения воды – использование плавающих солнечных панелей, снижающих испаряемость на 25-35 %. Подобные решения могут быть адаптированы и для Узбекистана, особенно в условиях дефицита водных ресурсов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследования демонстрируют, что внедрение гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) в энергетическую систему Узбекистана способно существенно повысить устойчивость, надёжность и экологичность энергоснабжения страны.

Технические и экономические результаты:

Строительство ГАЭС требует значительных инвестиций, в зависимости от географии, проектных решений и условий строительства стоимость ГАЭС обычно составляет \$1-3 млрд на каждые 1000 МВт установленной мощности в зависимости от региона. Стоимость строительства ГАЭС определяется необходимостью возведения двух водохранилищ с плотиной, сложностью рельефа и логистики, а также ценой импортного оборудования. Для проектов в горных регионах с уже существующими водоёмами затраты могут быть ближе к нижней границе диапазона [6, 10].

В рамках расширения гидроэнергетического потенциала Узбекистана в Бостанлыкском районе Ташкентской области планируется строительство гидроаккумулирующей электростанции «Юкори Пскем» мощностью 600 МВт. Общая стоимость проекта составит около 1 млрд долларов США. Реализация осуществляется на основе соглашения между АО «Узбекгидроэнерго» и китайской компанией China Southern Power Grid International, подписанного в ходе третьего международного форума «Один пояс, один путь» [17].

На основании проведённого анализа установлено, что оптимальная мощность одной ГАЭС для условий Узбекистана составляет **от 400 до 800 МВт**, с суточной цикличностью 8-12 часов и общим КПД цикла 72-85 %.

В таблице-1 показано что, средняя стоимость хранения энергии (LCOE_storage) для ГАЭС оценивается в пределах **0,05-0,13 USD/кВт·ч**, что в 3-4 раза ниже, чем для литий-ионных систем хранения (0,20-0,45 USD/кВт·ч) [10].

В результате математического моделирования по методике IRR и NPV установлено, что при тарифе на электроэнергию в 0,08 USD/кВт·ч срок окупаемости типового проекта мощностью 600 МВт составляет 11-13 лет, а внутренняя норма доходности IRR 8,2-10,7 %.

Таблица-1. Сравнительная экономическая эффективность технологий накопления энергии в Узбекистане.

№	Показатель	ГАЭС	Литий-ионные АКБ	Водородная система
1	КПД цикла, %	72-85	85-93	40-60
2	Срок службы, лет	50-80	10-15	25-30
3	Стоимость хранения, USD/кВт·ч	0,05-0,13	0,20-0,45	0,10-0,30
4	Сред. кап.вложения, млрд USD	0,9-1,4	0,5-0,8	0,7-1,2
5	Срок окупаемости, лет	11-13	8-10	15-20
6	Потенциал масштабирования	Высокий	Средний	Средний
7	Экологические риски	Низкие-средние	Средние	Средние-высокие

В сценарии с внедрением 4 ГАЭС совокупной мощностью 1,8-2,0 ГВт (по проектам Masdar и «РусГидро») предполагается возможность аккумулирования около 8-10 ГВт·ч электроэнергии в сутки, что покрывает до 12 % пикового спроса энергосистемы Узбекистана летом 2030 г.

Кроме того, реализация проектов ГАЭС позволит сократить долю вынужденного простаивания солнечных электростанций на 20-25 %, повысить коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ВИЭ с 0,32 до 0,42 и уменьшить дефицит мощности в часы вечернего пика на 1,1-1,3 ГВт, что эквивалентно производительности одной крупной тепловой электростанции.

Экологические и климатические эффекты:

В таблице-2 показано, как внедрение ГАЭС способствует сокращению выбросов парниковых газов за счёт снижения доли тепловых электростанций в покрытии пиковых нагрузок.

Расчёты показывают, что при полной загрузке четырёх станций (общей мощностью 2 ГВт) возможна ежегодная экономия до **1,6 млрд м³ природного газа**, который в настоящее время используется для регулирования энергосистемы.

С учётом удельного выброса CO₂ в 1,9 кг/м³ сожжённого газа это эквивалентно сокращению выбросов примерно на 3,0 млн тонн CO₂ в год [19].

Таблица-2. Прогноз влияния внедрения ГАЭС на выбросы CO₂ и экономию топлива (2026-2035 гг.).

№	Год	Кол-во ГАЭС (мощность, МВт)	Экономия газа, млрд м ³ /год	Снижение выбросов CO ₂ , млн т	Увеличение доли ВИЭ в балансе, %
1	2026	1 (500 МВт)	0,35	0,6	15
2	2030	2 (1000 МВт)	1,20	2,1	23
3	2035	3 (1500 МВт)	1,60	3,0	29

Данные получены на основе моделирования сценария «Энергия 2035» и отчётов IRENA и World Bank.

Кроме того, за счёт интеграции ГАЭС с солнечными электростанциями возможна дополнительная генерация от 0,5 до 0,8 ГВт·ч в сутки, обусловленная повышением эффективности ВИЭ. При этом совокупное сокращение выбросов к 2035 г. может составить около 10-12 млн тонн CO₂, что эквивалентно годовому объёму выбросов Ташкентской ТЭЦ. Эти показатели особенно актуальны в контексте обязательств Узбекистана по Парижскому соглашению: в рамках обновлённого Национально-определяемого вклада (NDC) страна планирует к 2030 году снизить удельные выбросы парниковых газов на 35 % по сравнению с уровнем 2010 года.

Прогноз развития ГАЭС до 2035 года: В рамках сценария устойчивого развития энергетики Республики Узбекистан к 2035 году возможна реализация от 4 до 6 объектов ГАЭС (мощностью 400-800 МВт каждая), что позволит создать совокупный запас регулирующих мощностей порядка 10-12 ГВт·ч.

На основании геологических и проектных данных, перспективны следующие регионы:

Пскемская область (Бостанлык, Ташкентская область) – строительство ГАЭС мощностью пул 500-600 МВт на Юкори Пскем; заявлено партнерство с Китаем [14];

Каратерен - Айдаркуль – по результатам ТЭО от «РусГидро», планируется 500 МВт (Каратерен) и 250 МВт (Айдаркуль) с возможностью насоса, мощность ночного аккумуляирования до 1 ГВт совокупно [15];

Также рассматриваются места в **Джизакской области**, Каракалпакстане, и ещё одна в Андижанской области [16];

Экономический эффект выражается не только в прямой прибыли от продажи электроэнергии, но и в косвенных выгодах:

- снижение импорта углеводородов на 120-150 млн USD в год;
- уменьшение сетевых потерь на 2,3-2,8 %;
- повышение надёжности энергоснабжения (SAIDI ↓ на 15 %).

Кроме того, развитие ГАЭС стимулирует создание новых производственных цепочек:

- строительство турбин и насосных агрегатов на территории Узбекистана (в кооперации с Китаем и ОАЭ);
- развитие внутреннего рынка инженерных услуг;
- подготовку специалистов в области гидроэнергетики и автоматизации.

Таким образом, результаты показывают, что внедрение ГАЭС в энергосистему Узбекистана может стать не только технологическим, но и социально-экономическим прорывом, позволяющим стабилизировать работу сети, сократить выбросы CO₂ и повысить устойчивость всей энергетической инфраструктуры страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показал, что развитие гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) в энергетической системе Узбекистана является **стратегически необходимым направлением**, обеспечивающим повышение надёжности, гибкости и экологичности электроснабжения страны.

В условиях ускоренного роста солнечной и ветровой генерации, ГАЭС становятся **ключевым звеном интеграции возобновляемых источников энергии**. Они позволяют компенсировать нестабильность ВИЭ, сглаживать пиковые нагрузки, а также выполнять функции аварийного и частотного резерва.

На основании проведённого исследования можно выделить следующие ключевые научные и практические выводы:

1. **Технологическая эффективность.** ГАЭС обеспечивают высокий коэффициент полезного действия (72-85 %) и срок эксплуатации более 50 лет, что делает их наиболее устойчивым инструментом накопления энергии в долгосрочной перспективе.

2. **Экономическая целесообразность.** Себестоимость хранения в ГАЭС (0,05-0,13 USD/кВт·ч) остаётся самой низкой среди известных технологий накопления, при этом капитальные затраты окупаются за 11-13 лет даже при умеренных тарифах на электроэнергию.

3. **Экологическая устойчивость.** Внедрение 4-6 ГАЭС к 2035 году позволит сократить выбросы CO₂ на 10-12 млн тонн и сэкономить до 1,6 млрд м³ природного газа ежегодно.

4. **Институциональный потенциал.** Проекты ГАЭС создают предпосылки для развития отечественного гидроэнергетического машиностроения, подготовки инженерных кадров и привлечения иностранных инвестиций.

Научная новизна и вклад в науку Представленные результаты обладают научной новизной и вносят вклад в развитие энергетических исследований Узбекистана и Центральной Азии:

предложена **адаптированная методика оценки эффективности ГАЭС** с учётом климатических факторов (испарение, сейсмичность, ограниченные водные ресурсы);

разработан **прогноз влияния внедрения ГАЭС на структуру энергобаланса и выбросы CO₂ до 2035 года**;

определены **приоритетные географические зоны** для строительства ГАЭС (Пскемская, Каратеренская и Айдаркульская системы);

обоснована **необходимость интеграции ГАЭС с ВИЭ**, что позволит увеличить КИУМ возобновляемых источников на 10-12%.

Рекомендации

На основе проведённого анализа рекомендуется:

1. Включить строительство 4-6 ГАЭС в **Национальную энергетическую стратегию до 2035 года** как приоритетное направление хранения энергии.

2. Создать **государственную программу подготовки инженерных кадров** в области гидроэнергетики и управления системами накопления энергии.

3. Привлечь международные финансовые институты (ADB, World Bank, EBRD) к реализации пилотных проектов через механизм «зелёных облигаций».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство энергетики Республики Узбекистан. Стратегия развития энергетики до 2035 года. — Ташкент, 2023. — 118 с.
2. Asian Development Bank. Uzbekistan Energy Transition Outlook 2023. — Manila: ADB, 2023. — 68 с.
3. Узгидромет. Отчёт о водных ресурсах Узбекистана за 2020-2023 гг. — Ташкент, 2023. — 34 с.
4. Институт сейсмологии АН РУз. Карта сейсмического районирования Узбекистана. — Ташкент, 2021. — 150 с.
5. Ташкентский государственный технический университет. Влияние климата на работу энергооборудования. — Ташкент, 2020. — 89 с.
6. International Renewable Energy Agency (IRENA). Global Energy Storage Outlook 2024. — Abu Dhabi: IRENA, 2024. — 98 p.
7. Melnikov S.E., Ivanov A.A. Гидроэнергетика и ГАЭС в энергосистемах. — Москва: Энергия, 2018. — 112 с.
8. Абдуллаев Р.Х. Гидроэнергетика Центральной Азии: проблемы и перспективы. — Ташкент: Фан, 2021. — 80 с.
9. Центр экономических исследований. Демография горных регионов Узбекистана. — Ташкент, 2020. — 56 с.
10. World Bank. Hydropower and Pumped Storage Potential in Uzbekistan. — Washington, 2021. — 94 p.
11. Schmidt S., Hamidov A., Kasymov U. Analyzing Groundwater Governance in Uzbekistan through the Lenses of Social-Ecological Systems and Informational Governance. // International Journal of the Commons, 2024. DOI: 10.5334/ijc.1322.
12. International Energy Agency (IEA). Technology Roadmap: Hydropower. — Paris: IEA, 2022. — 45 p.
13. REN21. Renewables 2024 Global Status Report. — Paris, 2024. — 208 p.
14. Пскемская ГЭС // Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Пскемская_ГЭС
15. Россия поможет Узбекистану построить новые гидроаккумулирующие электростанции. // e-CIS.info, 06.06.2024. URL: <https://e-cis.info/news/568/118715/>.
16. В Узбекистане построят четыре ГАЭС. // Sputnik Узбекистан, 13.03.2024. URL: <https://uz.sputniknews.ru/20240313/>.
17. В Бостанлыкском районе построят гидроаккумулирующую электростанцию мощностью 600 МВт. — 19.10.2023. URL: <https://uznews.uz/ru/news/68726>.
18. International Hydropower Association (IHA). Hydropower Sector Climate Resilience Guide. — London: IHA, 2022. — 44 p.
19. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy.