

РАЗВИТИЕ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ТАДЖИКИСТАНА: ПРОЕКТ ГЭС АЙНИ КАК ЭЛЕМЕНТ УСТОЙЧИВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Рахмонов Ш.С.^{1,*}, Хасанзода Б.М.¹, Гулахмадзода А.А.¹,
Давлатшоев С.К.¹, Азизов З.Б.¹

¹Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана

*Автор корреспонденции. E-mail: rahmonov0294@mail.ru

Аннотация. Настоящая статья посвящена всестороннему анализу проекта строительства Сада и Гидроэлектростанции «Айни» на реке Зарафшон в Таджикистане. Проект реализуется в сотрудничестве между Министерством энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан и иранской компанией «Фароб». Целью проекта является выработка возобновляемой гидроэнергии и повышение энергетической безопасности региона. Проведённый гидрометеорологический, сейсмологический, гидрологический и экономический анализ подтвердил технико-экономическую целесообразность строительства ГЭС с установленной мощностью 160 МВт. В статье представлены параметры водохранилища, объёмы осадков, притока и испарения, а также сравнительный анализ различных сценариев установки оборудования. Рассчитаны показатели ожидаемой генерации и рентабельности проекта [1].

Ключевые слова: Гидроэнергетика, ГЭС Айни, Зарафшон, водохранилище, технико-экономическое обоснование, альтернативная энергетика, устойчивое развитие, энергетическая безопасность.

Введение

Развитие гидроэнергетического потенциала Республики Таджикистан является приоритетным направлением национальной энергетической стратегии и важным условием устойчивого экономического роста, особенно с учётом географических, климатических и ресурсных особенностей страны. Обладая значительными водными ресурсами, Таджикистан занимает лидирующее положение в Центральной Азии по запасам гидроэнергии, значительная часть которых пока остаётся неосвоенной [2-4]. В условиях роста потребления электроэнергии [5], необходимости обеспечения надёжности электроснабжения и повышения уровня энергетической безопасности государства строительство новых объектов гидроэнергетики приобретает стратегическое значение.

Одним из таких перспективных проектов является возведение Сада и Гидроэлектростанции (ГЭС) Айни на реке Зарафшон. Этот проект инициирован в рамках сотрудничества между Республикой Таджикистан и Исламской Республикой Иран. Исходная договорённость по

реализации проекта была достигнута в 2007 году в ходе официальных межправительственных переговоров. В соответствии с подписанным меморандумом, технические и экономические исследования по проекту были поручены иранской инженерной компании «Фароб» при участии таджикской стороны в лице ОАО «Барки Точик» и Института «Гидропроект». Проект предполагает строительство бетонной плотины и гидроэлектростанции средней мощности (примерно 160 МВт) на одной из наиболее перспективных по энергетическому потенциалу рек страны — Зарафшон [6].

Особенностью данного проекта является его расположение в сложных орографических и гидроклиматических условиях. Река Зарафшон имеет высокогорное ледниково-снежное питание, характеризуется сезонной неравномерностью стока, значительными колебаниями уровня воды и высоким уровнем наносов, требующих специальных инженерных решений по осадкоудалению и защите оборудования. Кроме того, регион отличается повышенной сейсмической активностью,

что потребовало проведения детального сейсмологического анализа и выбора устойчивых инженерных конструкций плотины. Также учитывались аспекты воздействия на окружающую среду, затопление населённых пунктов и сельскохозяйственных земель, необходимость строительства новых транспортных коммуникаций (туннелей, мостов), вопросы переселения и компенсации.

Комплексное технико-экономическое обоснование, охватывающее период с 2009 по 2010 год, включало в себя метеорологические, гидрологические, геодезические, сейсмические и экологические изыскания, моделирование различных сценариев строительства плотины, выбор оптимальной конфигурации турбин, расчёт выработки электроэнергии, анализ испарения и потерь воды, оценку наносов, технико-экономический анализ вариантов высотного положения плотины (нормального подпорного уровня 1350 и 1377 м над уровнем моря). Результаты исследования демонстрируют, что при рациональной инженерной реализации проект ГЭС Айни способен обеспечить выработку более 600–700 млн кВт·ч в год, с возможностью покрытия пиковых нагрузок и интеграции в национальную энергосистему, а также экспорта электроэнергии в соседние страны.

Целью данной статьи является обобщение ключевых результатов технико-экономического анализа проекта ГЭС Айни, включая гидрологическое обоснование, характеристики водохранилища, сценарии установки оборудования, оценки энерговыработки и финансовой эффективности. Также представлена визуализация гидрологических параметров, таблицы климатических данных, характеристики вариантов плотины и инженерных решений, предлагаемых для минимизации рисков и увеличения эффективности проекта. Анализ проведён с учётом требований устойчивого развития, безопасности, экологичности и соответствия региональной энергетической политике Республики Таджикистан.

Анализ проекта

- Местоположение: район Айни, река Зарафшон
- Установленная мощность: 160 МВт
- Тип ГЭС: русловая, бетонная плотина RCC (90 м) или дугообразная (117 м)
- Объём водохранилища: до 300 млн м³
- Объём осадков в бассейне: 998 мм/год
- Среднегодовой приток: 138.11 м³/с (4380 млн м³/год) [7].

Варианты сооружения приведены на таблице 1.

Таблица 1. Сценарии установки оборудования.

Вариант	Тип агрегатов	Количество	Общая мощность (МВт)	Годовая выработка, GWh
А	2х65 + 2х95 (разные)	4	160	669 (в т.ч. гарантированная — 602)
В	4ходинаковые	1	130	~600

Технические параметры плотины

- Высота плотины: 90 или 117 м
- Тип водосброса: два туннеля по 7 м диаметром, длиной 720 м (двухкамерный вариант) или 380 м (RCC)

- План строительства включает 9 этапов от отвода русла до монтажа турбин

На рисунке 1 приведён гидрограф водообеспечения река Зарафшон.

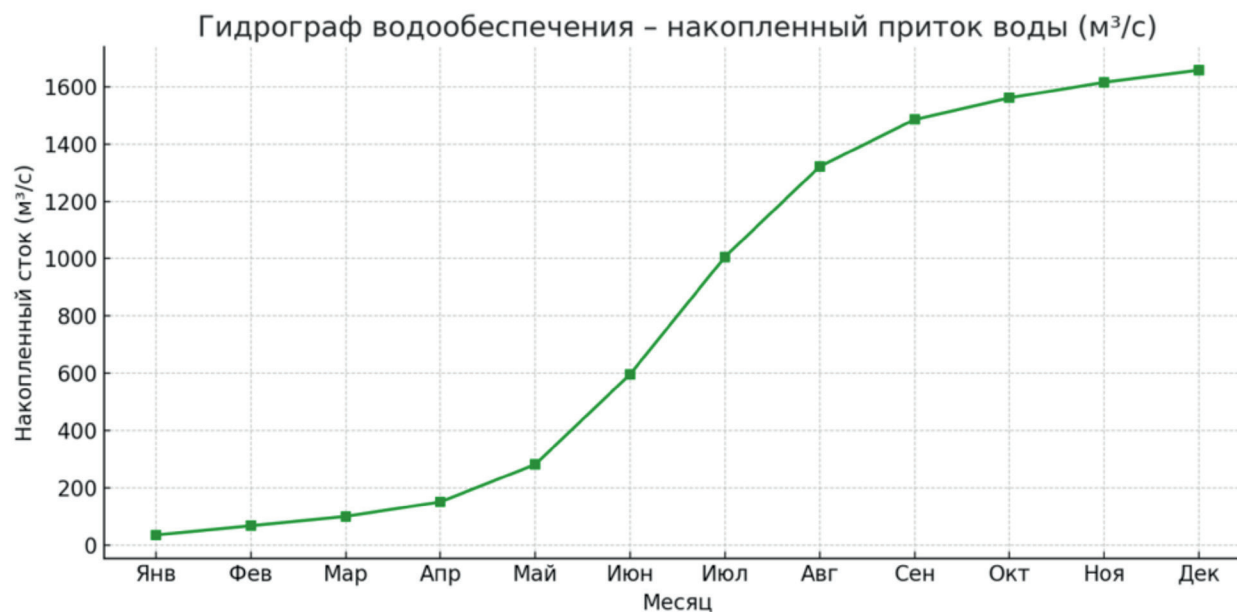


Рисунок 1. Гидрограф водообеспечения – накопленный приток воды.

На графике представлен гидрограф водообеспечения, отражающий накопленный объем стока по месяцам в районе ГЭС Айни. Он наглядно демонстрирует, что основной объем притока формируется в период с мая по август — время активного таяния ледников. Этот график

важен для планирования режима работы ГЭС, выбора мощности агрегатов и расчёта выработки электроэнергии [8].

На рисунке 2 приведена зависимость годовой генерации электроэнергии от установленной мощности.

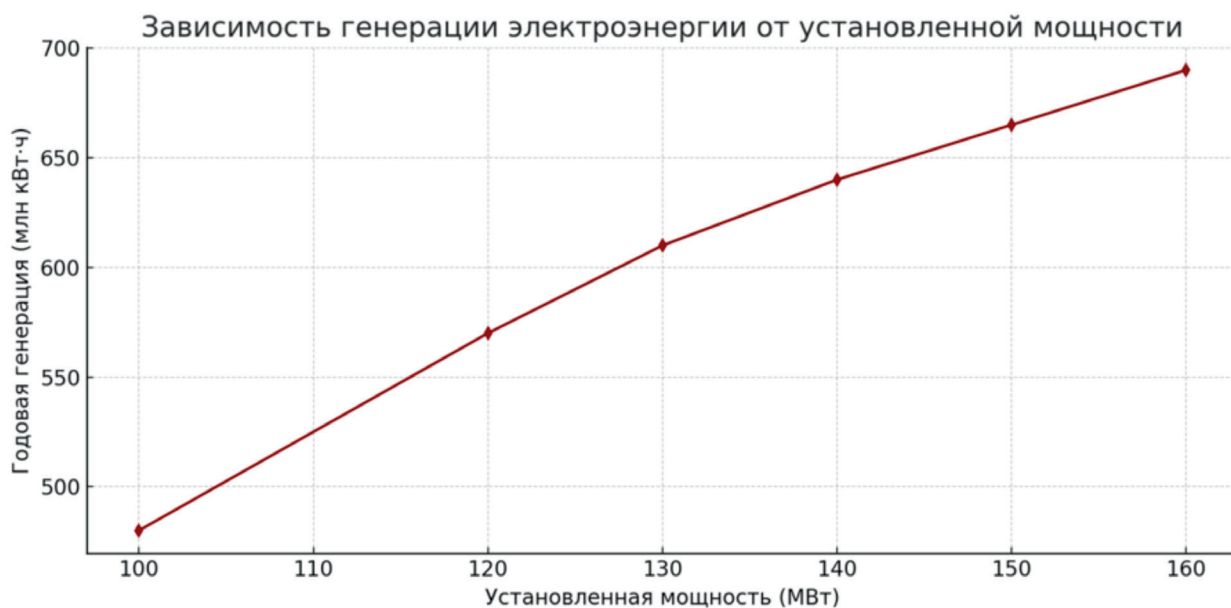


Рисунок 2. Зависимость годовой генерации электроэнергии от установленной мощности.

На графике представлена зависимость годовой генерации электроэнергии от установленной мощности ГЭС Айни. Как видно, с увеличением мощности наблюдается почти линейный рост выработки — от 480 млн кВт·ч при 100 МВт до 690 млн

кВт·ч при 160 МВт. Это позволяет обосновать выбор мощности как ключевого фактора экономической эффективности проекта.

На рисунке 3 и таблице 2 приведён среднемесячный сток реки Зарафшон.

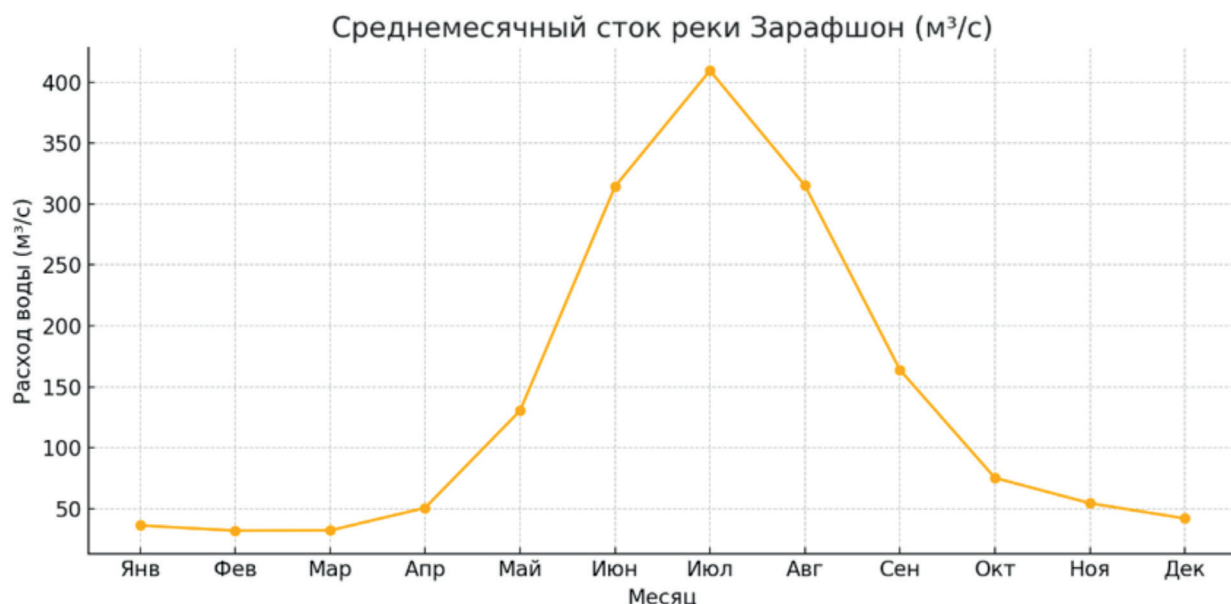


Рисунок 3. Среднемесячный сток реки Зарафшон.

График среднемесячного стока реки Зарафшон в районе проектируемой ГЭС Айни, основанный на многолетних гидрологических данных, показывает сезонную

изменчивость водообеспечения, с пиком в июле (409,5 м³/с) и минимумом в зимние месяцы. Таблица с точными значениями представлена выше.

Таблица 2. Годовой сток за 1960–2008 гг. (м³/с).

Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Средн	36.4	32.1	32.3	50.8	130.5	314.4	409.5	315.2	164.0	75.4	54.6	42.1
Всего (млн м³)	4380.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Результаты проведённого технико-экономического, гидрологического и климатического анализа проекта строительства Сада и Гидроэлектростанции (ГЭС) Айни на реке Зарафшон подтверждают его высокую эффективность и стратегическую важность для энергетической системы Республики Таджикистан. Исследование показало, что с учётом специфики гидрологического режима реки, режима осадков, испарения и объёмов наносов оптимальным вариантом является строи-

тельство плотины на отметке 1355 м над уровнем моря с нормальным подпорным уровнем 1350 м и использованием комбинированной конфигурации турбин мощностью 160 МВт.

Одним из ключевых факторов обоснования проекта стала высокая естественная водообеспеченность региона: среднегодовой приток воды в районе плотины составляет 138,1 м³/с, а в паводковый период (май–август) он достигает более 400 м³/с. Это обеспечивает значительный

потенциал генерации без необходимости создания слишком большого водохранилища. Однако, как показывает анализ, значительная доля годового притока сосредоточена в летние месяцы, что требует адаптированных инженерных решений по регулированию суточных и сезонных колебаний нагрузки, в том числе использования агрегатов различной мощности и дополнительной камеры осадкоудаления [9].

В климатических условиях района Айни, характеризующегося полугорным холодным климатом с высокой сезонностью, годовой объём испарения с зеркала водохранилища достигает 1572,8 мм, что требует учёта в водохозяйственном балансе станции. Также значительную проблему представляет накопление наносов, объём которых может достигать 5–6 млн тонн в год, что в перспективе может повлиять на полезный объём водохранилища и срок службы станции. Для минимизации негативных эффектов проектом предусмотрены инженерные меры по осадкоудалению (туннели, водосбросы, повышение уровня водозабора и др.).

Сравнительный анализ нескольких вариантов реализации проекта (с разными высотами плотины, типами генераторов и объёмами водохранилищ) продемонстрировал, что именно вариант с меньшей высотой плотины (90 м) позволяет:

- существенно снизить капитальные затраты (за счёт уменьшения объёма строительных работ и инфраструктуры переселения),
- сохранить мосты и дороги регионального значения,
- снизить уровень затопления населённых пунктов,
- а также продлить срок эксплуатации объекта за счёт ежегодного удаления части наносов.

Годовая выработка при установленной мощности 160 МВт составляет порядка 690 млн кВт·ч, из которых не менее 600

млн кВт·ч могут быть классифицированы как гарантированные. Это позволяет не только покрыть внутренние потребности, но и рассматривать ГЭС Айни как источник экспортной электроэнергии в рамках региональных энергетических инициатив (например, CASA-1000) [10].

Проект соответствует критериям устойчивого развития [11, 12]: он ориентирован на использование возобновляемого ресурса (гидроэнергии), снижает зависимость от импорта энергоресурсов, не производит прямых выбросов CO₂ и, при соответствующих экологических компенсирующих мероприятиях, может быть реализован с минимальным воздействием на окружающую среду. В то же время проект требует повышенного внимания к вопросам:

- защиты биоразнообразия,
- контроля сейсмических рисков,
- обеспечения безопасности сооружений в условиях возможных экстремальных паводков (селевые риски до 2900 м³/с).

Выводы

С учётом вышеизложенного, можно сделать следующие заключения:

- Проект ГЭС Айни технически реализуем, экономически оправдан и экологически допустим при соблюдении проектных рекомендаций.
- Оптимальная модель предполагает плотину с НПУ 90 м, 160 МВт установленной мощности, оснащение водозабора системами осадкоудаления, двухуровневый режим эксплуатации и возможность регулирования пиковой нагрузки.
- Проект способен внести существенный вклад в укрепление энергетической независимости Таджикистана, повысить надёжность энергоснабжения регионов, а также усилить экспортный потенциал национальной энергосистемы.

Таким образом, реализация проекта НБО Айни отвечает стратегическим задачам страны и может служить моделью для устойчивой гидроэнергетической трансформации Центральноазиатского региона.

Литература

1. Mahab Qods Consulting Engineers. Feasibility Study for Ayni HPP. Final Report. Tehran–Dushanbe, 2009–2010.
2. ОАО «Барки Тоҷик». Энергетическая стратегия Республики Таджикистан до 2030 года. Душанбе, 2015.
3. Халиков Х., Рахмонов Ш.С., Курбонализода С.Ш., Гулахмадов А.А., Давлатшоев С.К. Энергетические ресурсы Таджикистана. Часть 1. Гидроэнергетические ресурсы. Журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология» - Душанбе: ИМОГЭЭ, 2023 Т.3, №1. –С. 83-91.
4. Носыров Н.К., Сосин П.М., Давлатшоев С.К., Амирзода М.Х., Амирзода О.Х., Бобиев С.С., Основы экологической безопасности водохранилищ и ГЭС на примере Республики Таджикистан. Журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология», - Душанбе, №1 (4), 2021. С.73-81.
5. Исаев А. Б. Энергетическая безопасность стран Центральной Азии: вызовы и перспективы. — Алматы: САЕР, 2016. — 220 с.
6. Муталии Лоихаи сад ва неругоҳи Айни. Душанбе: Вазорати энергетика ва захираҳои оби Ҷумҳурии Тоҷикистон, 2010. – 60 с.
7. Национальный центр гидрометеорологии Таджикистана. Архивные гидрологические данные по реке Зарафшон (1960–2008 гг.).
8. Schulte V.L. Classification of glacial-fed rivers. Hydrology Journal, 1973.
9. Gensel C., Nelson A. Seismic Zoning Catalog. GeoRisk Press, 1982.
10. Asian Development Bank (ADB). Hydropower Development Strategy for Central Asia. — Manila, 2020.
11. Глобальный банк. Доклад по устойчивому управлению водными ресурсами в Центральной Азии. Вашингтон: The World Bank, 2020.
12. ООН. Сценарии климатических изменений и водная безопасность в Азии. — Женева: UNECE, 2019. Курбонов Ю.М.

ТАҲКИМИ ИҚТИДОРИ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИИ ТОҶИКИСТОН: ЛОИҲАИ НБО-И АЙНИ ҲАМЧУН УНСУРИ ЭНЕРГЕТИКАИ УСТУВОР

Раҳмонов Ш.С.^{1*}, Ҳасанзода Б.М.¹, Гулахмадзода А.А.¹,
Давлатшоев С.К.¹, Азизов З.Б.¹

¹Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экология Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

*Муаллифи масъул. E-mail: rahmonov0294@mail.ru

Шарҳи мухтасар. Мақолаи мазкур ба таҳлили ҳамаҷонибаи лоиҳаи сохтмони сад ва неругоҳи барқи оби «Айни» дар рӯди Зарафшони Ҷумҳурии Тоҷикистон бахшида шудааст. Лоиҳа дар ҳамкорӣ бо Вазорати энергетика ва саноати Ҷумҳурии Тоҷикистон ва ширкати иронӣ — «Фароб» амалӣ мегардад. Ҳадафи лоиҳа тавлиди энергияи барқароршавандаи обӣ ва таҳкими амнияти энергетикӣ минтақа мебошад. Таҳлилҳои гузаронидашудаи гидрометеорологӣ, зилзиласанҷӣ, гидрологӣ ва иқтисодӣ асоснок будани техникӣи иқтисодии сохтмони НБО-ро бо иқтидори насбшудаи 160 МВт тасдиқ намуданд. Дар мақола параметрҳои обанбор, ҳаҷми боришот, обовард ва бухоршавӣ, инчунин таҳлили муқоисавии сценарияҳои гуногуни насби таҷҳизот пешниҳод гардида, нишондиҳандаҳои интизори генерасия ва самаранокии иқтисодии лоиҳа ҳисоб карда шудаанд.

Калидвожаҳо: гидроэнергетика, НБО Айни, Зарафшон, обанбор, асосноккунии техникӣи иқтисодӣ, энергетикаи алтернативӣ, рушди устувор, амнияти энергетикӣ.

STRENGTHENING HYDROPOWER POTENTIAL OF TAJIKISTAN: THE AYNİ HPP PROJECT AS AN ELEMENT OF SUSTAINABLE ENERGY

Rakhmonov Sh.S.^{1,*}, Hasanzoda B.M.¹, Gulahmadzoda A.A.¹,
Davlatshoev S.K.¹, Azizov Z.B.¹

¹Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan

*Corresponding author: E-mail: rahmonov0294@mail.ru

Abstract. This article presents a comprehensive analysis of the construction project of the dam and the “Ayni” Hydropower Plant (HPP) on the Zarafshan River in the Republic of Tajikistan. The project is being implemented in cooperation with the Ministry of Energy and Industry of the Republic of Tajikistan and the Iranian company “Farab”. The goal of the project is to generate renewable hydropower and to enhance the region’s energy security. Conducted hydrometeorological, seismological, hydrological, and economic assessments have confirmed the technical and economic feasibility of constructing the HPP with an installed capacity of 160 MW. The article presents parameters of the reservoir, data on precipitation, inflow and evaporation volumes, as well as a comparative analysis of different equipment installation scenarios. It also provides calculated indicators of expected electricity generation and the project’s economic efficiency.

Keywords: hydropower, Ayni HPP, Zarafshan, reservoir, feasibility study, alternative energy, sustainable development, energy security.

Маълумот дар бораи муаллифони: Раҳмонов Шарифхуҷа Сайвалиевич – Ходими илмӣи Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи АМИТ. Адрес: ноҳияи Рудаки Ҷамоати Ҷортеппа деҳаи Кампир-Калъа хонаи 342, тел. (+992) 004044604, E-mail: rahmonov0294@mail.ru, Ҳасанзода Бехруз Муҳаммад - аспиранти Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи АМИТ. Адресс: ш. Душанбе, ноҳияи Сино, кӯчаи Нусратулло Махсум 111/3, хонаи 21 тел. (+992) 908855885, E-mail: bhasanzoda@outlook.com, Гулаҳмадзода Аминҷон Абдуҷаббор – доктори илмҳои техникаӣ, директори Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон. Адрес: Шаҳри Душанбе, кӯчаи Айни 65 хонаи 100, тел. (+992) 885471616, E-mail: agulakhmadov@gmail.com, Давлатшоев Саломат Қаноатшоевич – н.и.т., мудири озмоишгоҳи «Энергетика, захира- ва энергиясарфанамоӣ» -и АМИТ. Адрес: н. Рудаки, ҷ. Ҷортепа, д. Арбобхотун, тел. (+992 919604041), E-mail: salomatda@list.ru; Азизов Зӯхуршо Бобохонович-унвонҷуи Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи АМИТ. Тел.: (+992)987976175, E-mail: zursho-a@gmail.com.

Сведения об авторах: Раҳмонов Шарифхӯдҷа Сайвалиевич – Ходими илмӣ, Институти водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ. Адрес: Район Рудаки, община Ҷортеппа, село Кампир-Кала, дом 342, тел. (+992) 004044604, E-mail: rahmonov0294@mail.ru, Ҳасанзода Бехруз Муҳаммад - Аспирант Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ. Адрес: г. Душанбе, р-н Сино, ул. Нусратулло Махсум 111/3, кв. 21, тел. (+992) 908855885, E-mail: bhasanzoda@outlook.com, Гулаҳмадзода Аминҷон Абдуҷаббор – доктор технических наук, директор Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана. Адрес: г. Душанбе, улица Айни 141, кв. 100, тел. (+992)885471616, E-mail: agulakhmadov@gmail.com, Давлатшоев Саломат Қаноатшоевич – к.т.н. заведующий лабораторией «Энергетика, ресурсо- и энергосбережение» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ. Адрес: р. Рудаки, с/с. Ҷортепа, с. Арбобхотун, тел. (+992 919604041), E-mail: salomatda@list.ru; Азизов Зӯхуршо Бобохонович-Соискатель Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии НАНТ. Тел.: (+992)987976175, E-mail: zursho-a@gmail.com.

Information about the authors: Rakhmonov Sharifkhujja Saivalievich – Fellow Researcher of the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Address: Rudaki district, Chorteppa community, Kampir-Kala village, house 342, Phone: (+992) 004044604, E-mail: rahmonov0294@mail.ru, Hasanzoda Behruz Muhammad - Post-graduate student of the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Science. Address: Dushanbe, st. Nusratullo Makhsum 111/3, apt. 21, Phone: (+992) 908855885, E-mail: bhasanzoda@outlook.com, Gulakhmadzoda Aminjon Abdujabbor - Doctor of Technical sciences, Director Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Address: Dushanbe city, 141 Ayni Street, apt. 100, Phone: (+992) 885471616, E-mail: agulakhmadov@gmail.com, Davlatshoev Salomat Kanoatshoevich - Ph.D., The head Laboratory of Energy Resources and Energy Saving of the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Адрес: R. Rudaki, s/s. Chorteppa,

p. Arbobkhotun, Phone: (+992) 919604041, E-mail: salomatda@list.ru; Azizov Zuhursho Bobokhonovich- the Researcher of the Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Phone: (+992)987976175, E-mail: zursho-a@gmail.com

УДК 620.9(621.1, 621.311)

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В УСЛОВИЯХ ТАДЖИКИСТАНА. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Рахматов Дж.Ш.^{1,*}, Кайсова Д.Ф.^{1,2},
Саид Мохаммадзаде Бина³, Каримов Б.Х.¹

¹ Центр инновационного развития науки и новых технологий Национальной академии наук Таджикистана

² Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана

³ Graduate School of International Resource Sciences, Akita University

*Автор корреспонденции: E-mail: jamesd007@rambler.ru

Аннотация. В статье оцениваются перспективы внедрения геотермальных тепловых насосов в Таджикистане как одного из ключевых звеньев модернизации энергетической системы. Проанализированы принципы работы таких установок, их экономические и экологические преимущества, а также выявлены основные препятствия при интеграции в существующую инфраструктуру. Предлагаемые решения ориентированы на сокращение выбросов CO₂, стимулирование регионального экономического развития и повышение комфортности условий проживания.

Ключевые слова: геотермальная энергия, тепловые насосы, возобновляемая энергетика, энергосбережение, парниковые газы, теплоэнергетика.

Введение

Таджикистан, обладая выраженными климатическими и геоморфологическими особенностями, характеризуется значительными сезонными перепадами температур и сложным горным рельефом, что формирует особые условия эксплуатации систем теплоснабжения и кондиционирования. В этой связи использование геотермальных тепловых насосов (ГТН) представляет собой перспективное направление в контексте модернизации национальной энергетической системы [1-3]. Настоящее исследование направлено на всесторонний анализ современных технологических решений в области геотермальной энергетики с акцентом на их адаптацию к региональным условиям, технико-экономическую эффективность, а также на выявление основных институциональных и инфраструктурных барьеров, препятствующих широкому внедрению данных технологий [4, 5]. Особое внимание уделяется необходимости

применения междисциплинарных подходов и использованию инновационных инструментов моделирования и анализа с целью обоснования целесообразности интеграции ГТН в энергетический баланс республики.

Преимущества и ограничения геотермальных систем. Геотермальные тепловые насосы демонстрируют ряд существенных достоинств и ограничений, определяющих их применимость в Таджикистане и аналогичных регионах [2, 3].

Преимущества:

- Повышенная энергоэффективность по сравнению с традиционными системами отопления и кондиционирования за счёт использования почти постоянной температуры грунта [6, 7].
- Существенное снижение эксплуатационных расходов и выбросов загрязняющих веществ вследствие отказа от сжигания ископаемого топлива.
- Освобождение от зависимости импортных энергоносителей, что кри-