



Теплоэнергетические ресурсные потенциалы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда»

А. М. Пенджиев , П. О. Оразов

Туркменский государственный
архитектурно-строительный институт
(г. Ашгабат, Туркменистан)

 ampenjiyev@gmail.com

Аннотация

Введение. Использование экологически чистых инженерных систем, в частности солнечных энергетических технологий, способствует уменьшению энергозатрат, тем самым снижая себестоимость продукции и антропогенную нагрузку на окружающую среду.

Цель исследования. С помощью инновационных методик оценить тепловые ресурсные потенциалы солнечного излучения; рассмотреть солевые залежи залива в качестве тепловых аккумуляторов для разработки, внедрения и применения солнечных теплоэнергетических технологий; обосновать технико-экономическую целесообразность их использования в инженерных системах в заливе Кара-Богаз-Гол (Каспийский регион).

Материалы и методы. Методология основана на систематизированных теоретических расчетах валовых, технических, экономических и экологических потенциалов солнечного излучения с учетом природно-климатических условий. Методика расчетов базируется на методах математического моделирования процессов тепло-массообмена в геотехнических системах при преобразовании солнечной энергии в тепловую в соленом водоеме залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда».

Результаты исследования. Оценены солнечно-энергетические характеристики для внедрения различных инженерных аккумулирующих систем и технологий. Определены результаты аккумулирования в течение дня на солевой поверхности водоема: зимой – 1 009,0 Вт/м² сут.; летом – 1 574,7 Вт/м² сут. Доказано, что солнечно-энергетический потенциал преобразования в тепловую энергию меняется в пределах от 40 до 70 % в зависимости от сезона года, по теоретическим расчетам КПД солнечного пруда зимой составляет 11,4 %; летом – 14,6 %. Измерена средняя температура в летний период на солевой поверхности дна водоема, она составляет от 55,04 до 79,8 °С, зимой от 20,0 до 25,6 °С.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты исследования вносят вклад в укрепление энергетической безопасности, развитие энергетических систем и производства автономных теплоэнергетических устройств на основе солнечной энергии, что снизит энергопотребление органического топлива и улучшит экологическую обстановку в регионе. Материалы статьи могут быть использованы при разработке проектно-сметной документации, составлении технико-экономического обоснования для создания различных солнечно-энергетических систем и технологий в Каспийском регионе.

Ключевые слова: солнечная теплоэнергетика, энергетические потенциалы, солнечный пруд, залив Кара-Богаз-Гол, Каспийское море, Туркменистан

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Пенджиев А. М., Оразов П. О., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Пенджиев А. М., Оразов П. О. Теплоэнергетические ресурсные потенциалы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 474–494. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.474-494>

Thermal Energy Resource Potentials of the Kara-Bogaz-Gol Gulf as a “Solar Pond”

A. M. Penjiyev[✉], P. O. Orazov

Turkmen State Architecture and Construction Institute (Ashgabat, Turkmenistan)

[✉] ampenjiyev@gmail.com

Abstract

Introduction. The use of environmentally-friendly engineering systems including solar energy technologies make it possible to reduce energy costs and therefore to lower production costs and anthropogenic stress on the environment.

Aim of the Study. The authors used innovative techniques to assess the thermal resource potential of solar radiation, to analyze the salt deposits of the the Kara-Bogaz-Gol Gulf as thermal accumulators for the development, introduction and use of solar thermal technologies and to justify the technical and economic feasibility of their use in engineering systems in the Kara-Bogaz-Gol Gulf (Caspian region).

Materials and Methods. The study design is based on systematic theoretical calculations of the gross, technical, economic and ecological potentials of solar radiation taking into account environmental conditions. For calculating there were used the methods of mathematical modeling of heat and mass transfer processes in active solar energy systems when converting solar energy into thermal energy in the salty reservoir of the Kara-Bogaz-Gol Gulf as a “solar pond”.

Results. There have been assessed the solar energy characteristics for the introduction of various engineering storage systems and technologies. There have been determined the results of energy storage on the reservoir salt surface during the day: in winter – 1 009.0 W/m² per day, in summer – 1 574.7 W/m² per day. It has been proven that the potential of solar energy conversion into thermal energy varies from 40 to 70% depending on the season. According to theoretical calculations, the solar pond efficiency in winter is 11.4% and in summer – 14.6%. In summer, there was measured the average temperature on the salt surface of the reservoir bottom, it ranges from 55.04 to 79.8 °C, in winter from 20.0 to 25.6 °C.

Discussion and Conclusion. The results obtained can be used for strengthening energy security, developing energy systems and producing autonomous thermal power devices based on solar energy that will reduce the energy consumption of fossil fuels and improve the environmental situation in the region. The materials of the article can be used in preparing design estimates and and feasibility study for developing various solar energy systems and technologies in the Caspian region.

Keywords: solar thermal power engineering, energy potentials, solar pond, Kara-Bogaz-Gol Bay, Caspian Sea, Turkmenistan

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Penjiyev A.M., Orazov P.O. Thermal Energy Resource Potentials of the Kara-Bogaz-Gol Gulf as a “Solar Pond”. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):474–494. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.474-494>

Введение. Эффективное использование возобновляемых энергетических ресурсов в различных отраслях промышленности и хозяйства способствует укреплению энергетической и экологической безопасности, энергетических систем и устойчивому развитию страны¹.

Применение энергии Солнца актуально для Туркменистана, так как по расчетам технический потенциал энергии Солнца эквивалентен $1,4 \cdot 10^9$ т.т. в год. Одним из нетривиальных способов использования солнечной энергии являются «солнечные пруды» – соленые водоемы, в которых аккумулируется значительное количество тепловой энергии Солнца [1].

Предметом исследования является ресурсный потенциал солнечного излучения и солевые залежи залива Кара-Богаз-Гол как теплового аккумулятора.

Площадь залива Кара-Богаз-Гол составляет примерно 18 тыс. км², средняя глубина 4,7 м, концентрация глауберовой соли (мирабилит) от 310 до 350 ‰. Соль имеет следующие свойства: она белая с желтым или зеленым оттенком, черта имеет белый цвет, ее световые лучи просвечивают, твердость – 1,5–2; плотность – 1,49 г/см³. Химическая формула – Na₂SO₄·10H₂O. Статус ИМА – унаследованный минерал² [2].

Залив представляет для страны большой интерес, так как содержит в себе значительное количество химических элементов, использующихся в различных агропромышленных комплексах (АПК) и отраслях промышленности. Применение солнечных энергетических ресурсных потенциалов и аккумулярование тепла повысят энергоэффективность химического производства, уменьшат энергозатраты, тем самым снизят себестоимость продукции, сократят выбросы вредных частиц в биосферу и улучшат социально-бытовые условия населения.

Получение и использование химической продукции с помощью энергоэффективных систем и технологического оборудования для АПК на основе солнечной энергии является актуальной задачей в регионе [1].

Научным сообществом Туркменистана проделана большая исследовательская работа по использованию солнечной энергии: гелиоводонагревательные установки для горячего водоснабжения и кондиционирования воздуха; гелиотеплицы с грунтовыми биоаккумуляторами тепла, автономным энергообеспечением, замкнутым влагооборотом траншейного типа; гелиосушилки для сыпучих продуктов, волокнистых пиломатериалов, овощей, фруктов и железобетонных изделий; гелиоустановки для выращивания микроводорослей спирулины, хлореллы и сценедесмуса; автономный животноводческий гелиоэнергетический комплекс; гелиомелиоративный комплекс для водоснабжения отгонного животноводства в пустыне Каракум; жилищно-производственный фотоэлектрический комплекс для создания электроэнергии, тепла, холода, горячей и опресненной воды; безотходный гелиобиотехнологический комплекс с автономным энергоснабжением, состоящий из гелиобиотеплицы, теплонасосной и биогазовой установок одновременного производства животноводческой или птицеводческой и сельскохозяйственной продукции по замкнутому циклу.

¹ Бердымухамедов Г. М. Туркменистан на пути достижения целей устойчивого развития. Ашхабад : Туркменская государственная издательская служба, 2018. 468 с.

² Булатов С. А. Энциклопедия географа. Залив Кара-Богаз-Гол [Электронный ресурс]. URL: <https://click.ru/3Bm2zs> (дата обращения: 25.01.2023).

В работах [1; 3] проведены теоретические и практические расчеты, проанализирована работа вышеназванных установок и комплексов³.

Несмотря на многочисленные исследования по указанной проблематике, не выявлены валовые, технические, экономические и экологические потенциалы с использованием новой методики для энергоэффективного внедрения гелиоэнергетических технологий; не обоснована технико-экономическая целесообразность составления проектно-сметной документации, не рассмотрено математическое моделирование тепло-массообменных процессов аккумуляции с учетом природно-климатических и теплотехнических характеристик глауберовых солевых залежей, не учтены статистические показатели температуры солевого слоя для водоема Кара-Богаз-Гол⁴ [4].

Цель исследования – определить теплоэнергетические ресурсные потенциалы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда».

Задача исследования – составить математическую модель тепло-массообмена, на основе которой определить потенциалы аккумуляции тепловой энергии и КПД залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда»; методами математической статистики определить корреляционную зависимость, составить уравнение регрессии для технико-экономического обоснования (ТЭО) с целью разработки, внедрения и использования различных солнечных тепловых инженерных технологий и систем в заливе Кара-Богаз-Гол в Каспийском регионе.

Обзор литературы. Использование солнечных прудов практикуется в мире уже не первый год. В настоящее время изучению и использованию тепловых ресурсов солнечных прудов уделяется большое внимание [5–7]. В работах В. И. Виссарионова, Дж. Дафф, С. Адилова, А. Монжези и других авторов представлены технологическая схема теплоэнергетической станции «солнечный пруд» и принцип работы электростанции «солнечный пруд», состоящий в поступлении горячей воды в испаритель (теплообменник) с парогенератором, который вращает электрогенератор⁵. Они доказали, что концентрация соли в придонном слое солнечного пруда в процессе нагревания увеличивается, так как соль в более теплой воде растворяется быстрее. Зафиксированы случаи, когда температура придонного солевого слоя достигала 110 °С [8–10].

Интерес ученых вызывают происходящие тепловые процессы с использованием солнечной энергии [6]. В свою очередь В. Дубковский, А. Денисова приводят примеры использования солнечных прудов в комбинированных энергоустановках с другими возобновляемыми источниками энергии для ресурсосбережения [11], а Ю. У. Умаров с коллегами в процессе изучения результатов экспериментальных

³ Использование солнечной энергии / под общ. ред. Л. Е. Рыбаковой. – Ашхабад : Ыльм. 1985. 280 с.; Стребков Д. С., Пенджиев А. М., Мамедсахатов Б. Д. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане. М. : ГНУ ВИЭСХ, 2012. 496 с.

⁴ Комплексный спутниковый мониторинг морей России : моногр. / Лаврова О. Ю. [и др.]. – М. : ИКИ РАН, 2011. 385 с. URL: <https://clck.ru/3Bm6JE> (дата обращения: 26.01.2023); Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, ч. 1–16. Л. : Гидрометиздат, 1989. 502 с. URL: https://elibr.rshu.ru/files_books/pdf/img-213102023.pdf (дата обращения: 25.01.2023).

⁵ Виссарионов В. И. Солнечная энергетика : учебное пособие для вузов / под общ. ред. В. И. Виссарионова. – М. : Издательский дом МЭИ, 2008. 276 с. URL: <https://www.c-o-k.ru/library/document/12813/35694.pdf> (дата обращения: 26.01.2023); Даффи Дж. А. Основы солнечной теплоэнергетики. М. : Издательский дом Интеллект, 2013. 884 с.

исследований теплового режима соленого солнечного бассейна выявили, что согласно теоретическим данным, температурные показатели при увеличении солености воды до максимальной отметки могут быть повышены до 150 °С [12; 13].

Российские ученые, проанализировав тепловые характеристики и конвективную устойчивость солнечного пруда, привели обобщенную стационарную модель [14]. Также ряд авторов исследовали системы теплоснабжения на основе солнечных прудов в северной зоне Российской Федерации и пришли к выводу, что извлечение накопленного тепла для таких целей, как отопление помещений и производство электроэнергии, является одной из основных целей проектирования и строительства солнечных прудов. Разделение отвода тепла в солнечных прудах на два метода (метод прямого отвода и метод косвенного отвода тепла) обосновало перспективы строительства опытно-промышленного солнечного пруда в Крыму [11; 15].

Экспериментальные исследования по использованию «солнечных прудов» в качестве источника получения тепловой и электрической энергии проводились учеными США, Израиля, Италии, Японии, Венгрии. Так, Н. Sogukpinar, Q. Wu, Y. Rghif доказали, что в условиях насыщения температурный градиент, вызванный солнечной радиацией, приведет к градиенту концентрации, если в пруду присутствует достаточно соли для создания стабильного солнечного пруда. Равновесный солнечный пруд имеет следующие ключевые преимущества перед обычными водоемами:

1. Термическая эффективность равновесного пруда повышается за счет высокой концентрации в нижней части пруда;

2. Растворимость соли, используемой в равновесном солнечном пруду, увеличивается с температурой. Следовательно, нет необходимости регулярно поддерживать концентрацию соли. Некоторые соли, такие как нитрат калия (KNO_3), хлорид кальция ($CaCl_2$), бура ($Na_2B_4O_7$), нитрат аммония (NH_4NO_3) и хлорид магния ($MgCl_2$), являются обычными растворенными веществами, используемыми в равновесных солнечных прудах;

3. Сравнительное исследование различных возобновляемых источников энергии, рассмотренных в этом исследовании, проиллюстрировано. Сравнились источник энергии, зрелость, стоимость, эффективность, уникальные преимущества и ограничения источников энергии [16–18].

До сих пор не исследованы теплоэнергетические ресурсные потенциалы солнечного излучения в качестве аккумуляирования тепловой энергии в соленом водоеме Кара-Богаз-Гол как «солнечном пруде»; не сформулированы рекомендации по реализации освоения возможностей гелиотехнологии в зависимости от природно-климатических условий с учетом экологических, экономических аспектов и технических ресурсов прикаспийской зоны Туркменистана⁶ [4].

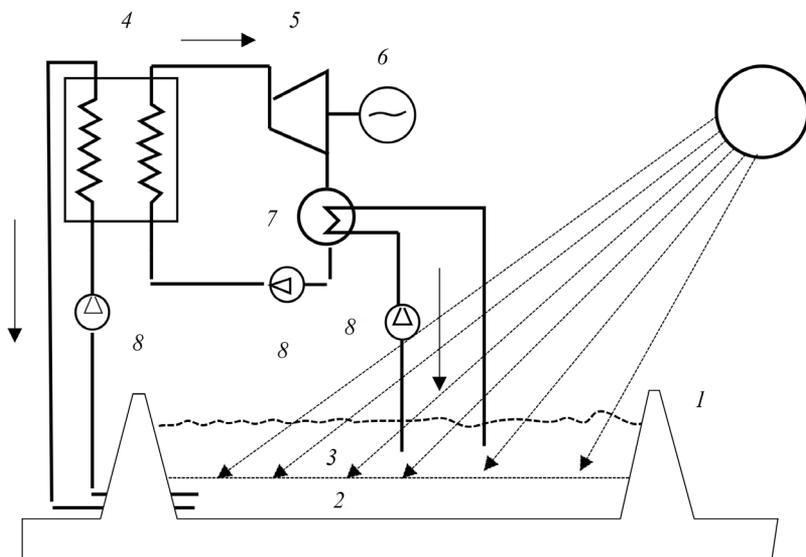
Для научного обоснования и систематизирования тепловых энергетических ресурсных потенциалов солнечного излучения залива Кара-Богаз-Гол по формализованной методике были рассмотрены длительность сияния Солнца по месяцам в течение года; средние рабочие температуры гелиоустановки и природной среды

⁶ Пенджиев А. М. Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии : моногр. М. : Русайнс, 2023. 400 с.

за месяц и год; альbedo поверхности гелиоустановки, доли рассеянного излучения, угловые параметры падения солнечной энергии на поверхности, нормально и наклонно ориентированные в течение месяца; удельный часовой угол движения склонения Солнца и наклона поверхности к горизонту.

Исходя из физического принципа и процесса тепло-массообмена, составлено дифференциальное уравнение теплового баланса водоема за промежуток времени. На основе уравнения рассчитаны суточный и годовой ход аккумуляирования солевой залежи залива. Процесс преобразования солнечного излучения в тепловую энергию и ее аккумуляирование является таким энергетическим явлением, как «солнечные пруды».

В настоящее время в мировой практике используется ряд соленых озер и морей с искусственными «солеными прудами» для производства тепла. Этот процесс относится к классу активных солнечных систем. В данном исследовании предлагаем возможность для строительства энергетической станции на принципах «солнечного пруда» в условиях залива Кара-Богаз-Гол. Технологическая схема теплоэнергетической станции «солнечный пруд» для Кара-Богаз-Гол представлена на рисунке 1.



Р и с. 1. Солнечная теплоэлектростанция на заливе Кара-Богаз-Гол как «солнечный пруд»:
1 – дамба; 2 – горячая вода с высокой концентрацией соли; 3 – охлажденная вода;
4 – теплообменник; 5 – турбина; 6 – электрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – насосы

F i g. 1. Solar thermal power plant on the Kara-Bogaz-Gol Gulf as a “solar pond”:
1 – dam; 2 – hot water with a high salt concentration; 3 – chilled water; 4 – heat exchanger;
5 – turbine; 6 – electric generator; 7 – capacitor; 8 – pumps

Источник: составлено по схемам авторов В. И. Виссарионова, Дж. А. Даффи и Д. С. Стребкова⁷
Source: the diagram is compiled from the diagrams of Vissarionov V.I., Duffy J.A. and Strebkov D.C.

⁷ Виссарионов В. И. Солнечная энергетика : учебное пособие для вузов; Даффи Дж. А. Основы солнечной теплоэнергетики; Родионов В. Г. Энергетика : проблемы настоящего и возможности будущего. М. : ЭНАС, 2010. 352 с. URL: <https://click.ru/3Bm6wV> (дата обращения: 24.01.2023).

Работа электростанции по принципу «солнечного пруда» состоит из процесса поступления горячей воды из уровня 2 в испаритель (теплообменник) 4 с помощью насоса 8. Там находится парогенератор, в который идет низкотемпературный пар в турбину 5 (в виде низкокипящей жидкости). Турбина запускает движение электрогенератора 6. Затем пар отправляется в конденсатор 7, туда же поступает холодная вода из водоема 3 с помощью насоса 8. Схема функционирует в замкнутом цикле. Принцип работы рассмотренной системы не отличается от парогенераторных станций, где эффективность зависит от перепадов температуры между слоями горячей 2 и холодной 3 воды [15; 16].

Преимуществом использования естественного залива является отсутствие необходимости завоза соли, строительства необходимых сооружений, что снижает финансовые затраты.

Таким образом, тепловые ресурсные потенциалы солнечных соляных прудов могут стать дополнительным источником тепла, использующегося в различных отраслях промышленности, для снабжения населения в период отопительного сезона, а также служащего дополнительным источником низкопотенциального тепла для теплонасосных установок в наиболее холодный и летний периоды года в зоне залива Кара-Богаз-Гол.

Материалы исследования. *Гидрометеорологические особенности солнечного излучения в заливе.* Спектральная карта температуры поверхности Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол по данным ИК-изображения спутника NOAA-16 за март, апрель, август, октябрь приведена на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, температурный режим воды в заливе отличается от Каспийского моря. Если средняя температура воды моря составляет 13,5 °С в год, то в заливе она равна 16,9 °С. По сезонам года средний температурный режим залива изменяется от 0,9 °С зимой и до 26 °С летом. Максимальная температура воздуха летом доходит до 64 °С, средняя минимальная температура зимой снижается до 3 °С⁸ [2].

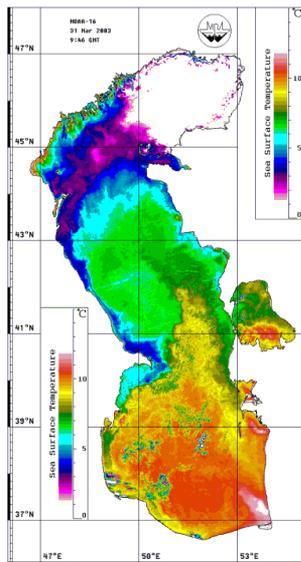
По результатам гидрометеорологического анализа построен график изменения температуры воды, скорости ветра, продолжительности солнечного сияния, количества пасмурных дней и осадков по месяцам года. Графическое изображение приведено на рисунке 3⁹.

Из графика видно, что среднемесячный ветровой режим меняется по сезонам года: в зимний период скорость ветра повышается и составляет в среднем 6,2 м/с, а летом снижается до 5,7 м/с.

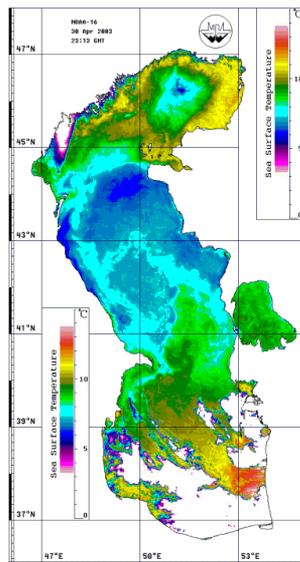
Количество осадков на территории залива в среднем составляет 104 мм в течение года, в месяц – 8,7 мм. За год продолжительность солнечного сияния составляет в среднем 2 674 ч, в сутки – около 7,8 ч, несолнечных дней – 32.

⁸ Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова [и др.].

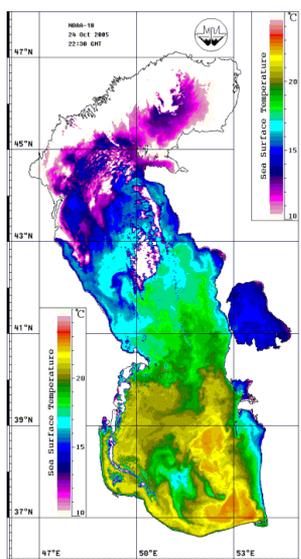
⁹ Там же; Научно-прикладной справочник по климату СССР; Булатов С. А. Энциклопедия географа. Залив Кара-Богаз-Гол [Электронный ресурс]. URL: <https://elck.ru/3Bm2zs> (дата обращения: 25.01.2023).



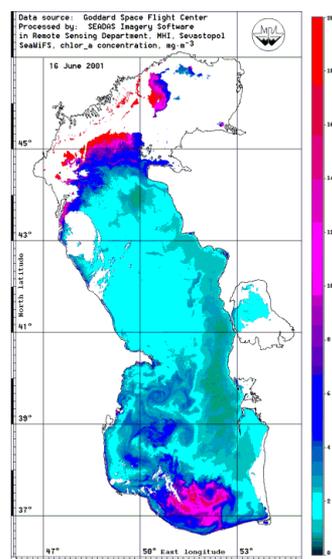
a)



b)



c)



d)

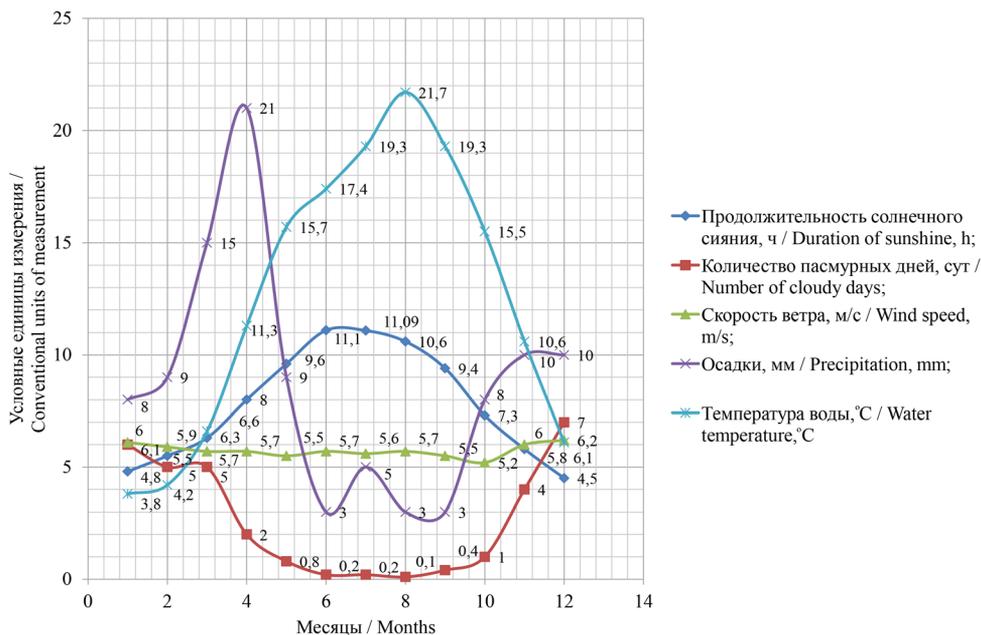
Р и с. 2. Атлас температуры поверхности Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол по данным ИК-изображения спутника NOAA-16 на: а) март; б) апрель; в) август; д) октябрь

Fig. 2. Atlas of surface temperature of the Caspian Sea and the Kara-Bogaz-Gol Bay from IR image data made by the NOAA-16 satellite for: a) March; b) April; c) August; d) October

Источник: составлено авторами по¹⁰ [2].

Source: the diagram is compiled according by the authors [2].

¹⁰ Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова [и др.].
Instruments and methods of experimental physics



Р и с. 3. Гидрометеорологический анализ залива Кара-Богаз-Гол по месяцам года
 F i g. 3. Hydrometeorological analysis of the Kara-Bogaz-Gol Gulf by month of the year

Источниk: составлено авторами статьи.
 Source: the diagram is compiled according by the authors.

Методика оценки теплоэнергетических ресурсных потенциалов солнечного излучения залива Кара-Богаз-Гол. Методика определения валового потенциала основана как на суммарной интенсивности поступления солнечного излучения, так и на географических, природно-климатических и атмосферных явлениях, при этом альбеdo является однородным по всей площади залива Кара-Богаз-Гол. Фиксировались расчетные и полученные исходные данные: среднемноголетний приход солнечного излучения на горизонтальную поверхность; месторасположение и широта местности; астрономический часовой пояс и направление угла; продолжительность солнечного сияния и угол склонения в течение года; валовый, технический и экономический потенциалы; коэффициенты альбеdo, отражения, теплопроводности, пропускания в зависимости от угла склонения и многие другие экономические и экологические показатели. Данный метод был выбран для исследования в силу его наибольшей точности в условиях данного климата.

Исследуя многолетние гидро- и метеонаблюдения по справочникам и данным Гидрометеослужбы с учетом неблагоприятных атмосферных явлений в регионе Кара-Богаз-Гол, выяснили, что сумма валового потенциала или годового прихода солнечной радиации на горизонтальную поверхность составляет 1 685,4 кВт·ч/м² в год. При этом небольшая нижняя облачность снижает поступление солнечной радиации на 27–35 % и увеличивает на 25–40 % при рассеянной радиации, а годовое

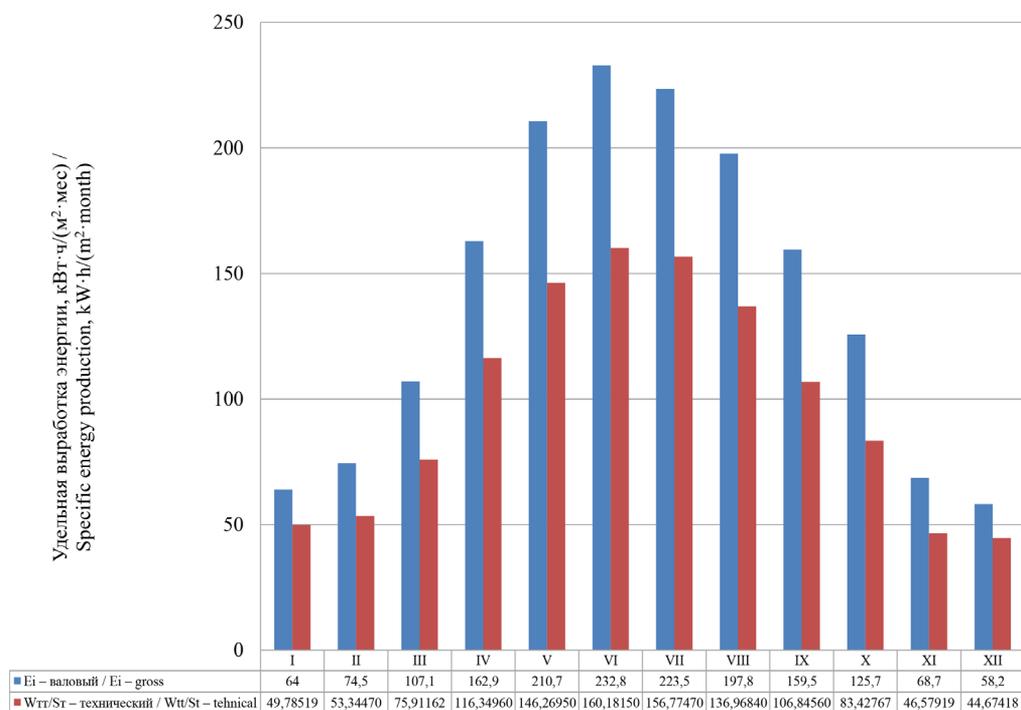
поступление суммарной солнечной радиации в реальных условиях облачности снижается на 13–19 % на территории залива¹¹.

Подробная методика определения технического, экономического и экологического потенциалов с учетом различных вариантов преобразования в тепловую и электрическую энергии представлена в работах [3; 4].

Технический потенциал гелиоизлучения в районе залива – средняя суммарная энергия в течение одного года, изученная при соблюдении всех экологических норм, с применением новейших методик расчета при высоком уровне инновационных технологий.

Технический потенциал солнечного излучения – это сумма технических потенциалов, которые с помощью водонагревателей при КПД 50 % преобразуются в тепловую энергию, равную 1 381,6 кВт·ч/м² в год [1; 3].

На рисунке 4 представлена гистограмма валового и технического потенциалов преобразования солнечного излучения в тепловую энергию по месяцам года.



Р и с. 4. Распределение валового и технического потенциала солнечной энергии, преобразованной в тепловую энергию в заливе Кара-Богаз-Гол по месяцам на 1 м²

F i g. 4. Distribution of the gross and technical potential of solar energy converted into thermal energy in the Kara-Bogaz-Gol Gulf by month per 1 square meter

Источник: составлено авторами статьи.

Source: the diagram is compiled according by the authors.

¹¹ Пенджиев А. М. Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии.

Экономический потенциал залива – выработка тепловой энергии от суммарного солнечного излучения, составляющая 552,6 кг у.т./м² в год для данного региона с учетом существующего уровня цен на энергию, получаемую от традиционных источников при условии выполнения экологических требований [1; 3].

Экологический потенциал является частью технического потенциала, который целесообразно преобразовать в полезную энергию при существующем уровне вредных выбросов в атмосферу, при переработке ископаемого органического топлива в тепловую энергию и другие виды энергии [1; 3].

Солнечная энергия, по сравнению с традиционными видами энергии, обладает возможностью обеспечить экологическую чистоту установок и улучшить экологическую обстановку [2; 5]. Из сумм экономических потенциалов тепловой энергии при преобразовании в нее солнечного излучения складывается экологический потенциал гелиоэнергии [1; 3; 23].

В таблице показано потенциальное сокращение вредных выбросов в атмосферу при эксплуатации тепловых водонагревателей в районе залива Кара-Богаз-Гол.

Т а б л и ц а
T a b l e

Энергетические, технические, экономические и экологические показатели сокращения выбросов вредных веществ в окружающую среду при использовании солнечных водонагревателей [23]

Energy, technical, economic and environmental indicators for reducing emissions of harmful substances into the environment when using solar water heaters [23]

Валовые ресурсы солнечного излучения, кВт·ч/(м ² ·год) / Gross resources of solar radiation, kWh/(m ² ·year)	Потенциалы / Potentials		Антропогенные нагрузки вредных веществ, кг/(м ² год) / Anthropogenic loads of harmful substances, kg/(m ² year)					
	Технический эквивалент выработки, кВт·ч/(м ² ·год) / Technical equivalent of output, kWh/(m ² ·year)	Экономия расхода топлива, кг у.т./(м ² ·год) / Fuel consumption savings, equivalent fuel kg/(m ² ·year)	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	CO ₂	Твердых веществ / Solids
1 978,3	1 381,6	552,6	11,5	6,2	0,79	1,69	883,7	1,17

Теплоэнергетические расчеты работы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда». Теплоэнергетические особенности работы «солнечного пруда» заключаются в следующем: солнечное излучение поступает на водную поверхность водоема, часть отражается в окружающую среду, часть проникает в водоем и попадает на солевую поверхность дна, частично отражаясь от солевого слоя, часть солнечного излучения проникает в солевой слой, тем самым преобразовываясь в тепловую энергию. Другими словами, часть солнечного излучения аккумулируется. Такое тепловое явление называется «солнечным прудом» [15; 16].

Процесс формирования теплоэнергетического режима аккумуляции в соленом водоеме очень сложный. Однако в отдельных случаях и при введении ряда упрощающих допущений можно осуществить количественный анализ формирования термических условий в солевых залежах на дне залива.

В водоеме на процесс формирования температурных условий в соленой воде, на аккумуляцию в солевых залежах на дне залива влияет большое количество факторов: метеорологические факторы – солнечное излучение, температура воздуха и воды, скорость ветра, облачность и т. д.; термическая характеристика соли и почвы – теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуропроводность, альbedo поверхности водоема и солевые залежи; теплотехнические характеристики водоема – кратность объема, плотность, воздухообмен, прозрачность в видимом и инфракрасном частях спектра. Следовательно, определение температур воздуха, воды, соли проводилось с учетом всех перечисленных факторов.

Согласно данным гидротехнических исследований, по динамике теплообмена можно сформулировать основные черты упрощенной модели: водоем как система в пространстве, однородно заполненная хорошо перемешанной соленой водой, полуограниченный водяной массив; боковые ограждения с нулевой теплоемкостью; солнечное излучение равномерно распространяется по воздушному, водному и солевому пространствам залива.

Динамика тепло- и массообмена в солнечном соленом водоеме. Солнечный соленый водоем Кара-Богаз-Гол рассматриваем как «солнечный пруд», физический принцип динамики тепло- и массообмена работы которого заключается в следующем: солнечное излучение поступает на поверхность водоема, часть отражается, часть проникает в низко-конвертированную зону, аккумулирует тепловую энергию в соленом растворе, часть тепла уходит в грунт. Часть тепловой энергии с поверхности водоема уходит в окружающую среду за счет конвективного теплообмена, лучистого излучения и испарения.

На формирование динамики процесса тепло- и массообмена в солнечном соленом водоеме оказывают большое влияние разнообразные факторы:

– гидрометеорологические – солнечное излучение (q_b^*), продолжительность и время солнечного сияния, облачность (μ), температура воздуха окружающей среды (T_n), водоема (T_b), солевого слоя (T_c) и почвы (T_n), скорость ветра (v) и некоторые другие параметры;

– теплотехнические, термические, физические и химические свойства соли водоема: теплопроводность воды (λ_b), соли (λ_c); теплоемкость воды (c_b), соли (c_c); плотность воды (ρ_b), соли (ρ_c); температура поверхности воды (a_b), соли (a_c); альbedo поверхности воды (r_b), (r_c) и другие параметры.

При исследовании динамики процесса тепло- и массообмена учтены все вышеприведенные основные факторы. Расчет тепло- и массообмена солнечного водоема связан в совокупности с температурным режимом воды, воздуха, поверхности соли, отложенной на дне водоема, с временем изменений по месяцам в течение года.

Разработка рабочей математической модели. Неоднократно проводились научные исследования по математическому моделированию тепловых процессов солнечно-энергетических установок, но применительно к соленому водоему

залива Кара-Богаз-Гол и с учетом природно-климатических условий Каспийского побережья по месяцам в течение года динамика процесса тепло- массообмена не рассматривалась.

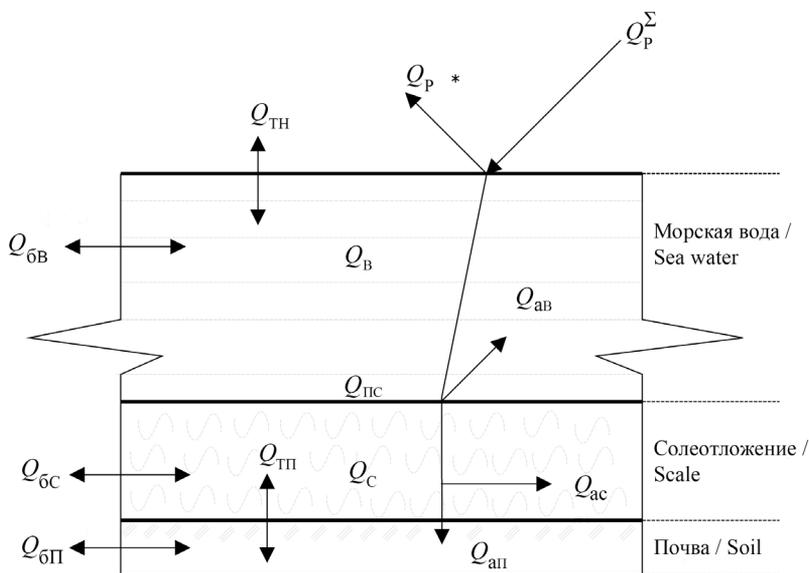
Возможность решения задачи динамики процесса тепло- массообмена солнечного залива изучали на основе физической модели. Проект рабочей математической модели производили с некоторыми упрощениями:

- солнечный залив рассматривался как система, состоящая в некотором пространстве одномерном и однородном с соленой водой, с ограниченным массивом в объеме 1 м^3 ;

- система обогрева предполагает, что солнечное излучение равномерно распределено по всему объему водоема на 1 м^2 ;

- динамика системы тепло- и массообмена описана в виде дифференциального уравнения теплового баланса за промежуток времени.

Физическое представление динамики процесса тепло- и массообмена в одномерном пространстве приведено на рисунке 5.



Р и с. 5. Одномерная расчетная физическая модель тепло- и массообмена в заливе Кара-Богаз-Гол

F i g. 5. One-dimensional computational physical model of heat and mass transfer in the Kara-Bogaz-Gol Gulf

Источник: схема составлена авторами статьи.

Source: the diagram is compiled according to the authors.

Солнечные излучения, аккумулированные в искусственном или естественном соленом водоеме, рассматриваются как водяные солнечные коллекторы, называемые «солнечными прудами». Основным условием функционирования такой системы является наличие градиента концентрации соли по толще воды в неглубоких водоемах.

Описание дифференциального уравнения теплового баланса. На основе физического принципа и процесса тепло- массообмена составлено и рассмотрено дифференциальное уравнение теплового энергетического баланса залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» за промежутки времени, dt . Оно имеет вид:

$$dQ_p^\Sigma - dQ_c - dQ_b - dQ_{TH} - dQ_{ав} - dQ_{ac} - dQ_{бр} = 0, \quad (1)$$

где dQ_p^Σ – суммарный поток тепла солнечного излучения, поступающий в соленый водоем, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$;¹² $dQ_{аб}$ – поток солнечного излучения, который аккумулируется в водном объеме, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; dQ_c – поток солнечного излучения, поглощенный солевой поверхностью дна пруда и почвой + $dQ_{п}$, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; dQ_b – поток солнечного излучения, поступающий на водную поверхность водоема, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; dQ_{TH} – количество тепла, отдаваемое в атмосферу с поверхности в результате воздухообмена и теплопередачи, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; $dQ_{бр}$ – количество тепла, отдаваемое в боковые грунтовые поверхности водоема в одномерном пространстве на 1 м^2 , объем не учитываем, $dQ_{бр} \approx 0 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; dQ_{ac} – поток солнечного излучения, аккумулированный в солевом слое на дне, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ [22].

Подставляем составляющие в значения к величинам dQ_p^Σ , dQ_b , dQ_c , dQ_{ac} , $dQ_{ав}$ балансового дифференциального уравнения (1) и представляем их в виде:

$$\begin{aligned} dQ_p &= (1 - r_b) F \cdot q^*(\tau) dt, \\ dQ_c &= c_c \gamma_c \xi_c \rho_c F [T_c(\tau) - T_b(\tau)] dt, \\ dQ_b &= c_b \gamma_b \xi_b \rho_b F [T_b(\tau) - T_H(\tau)] dt, \\ dQ_{TH} &= c_b \gamma_b \xi_b \rho_b F [T_b(\tau) - T_H(\tau)] dt, \\ dQ_{ав} &= c_b \gamma_b \rho_b F dT_b(\tau), \\ dQ_{ac} &= c_c \gamma_c \rho_c F dT_c(\tau), \end{aligned} \quad (2)$$

где F – площадь водоема, м^2 ; $\rho_{b,c}$ – плотность воды, соли, $\text{кг}/\text{м}^3$; ξ_b – кратность воздухообмена с поверхности водоема; $r_{b,c}$ – альbedo воды, поверхность соли; $c_{c,b}$ – объемная теплоемкость соленой воды, воздуха, $\text{кДж}/\text{кг}\cdot\text{°C}$; $\gamma_{c,b}$ – плотность соленой воды, воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; q^* – поток солнечного излучения на горизонтальную поверхность, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; T_H – температура наружного воздуха, °C ; T_b – температура воды водоема, °C .

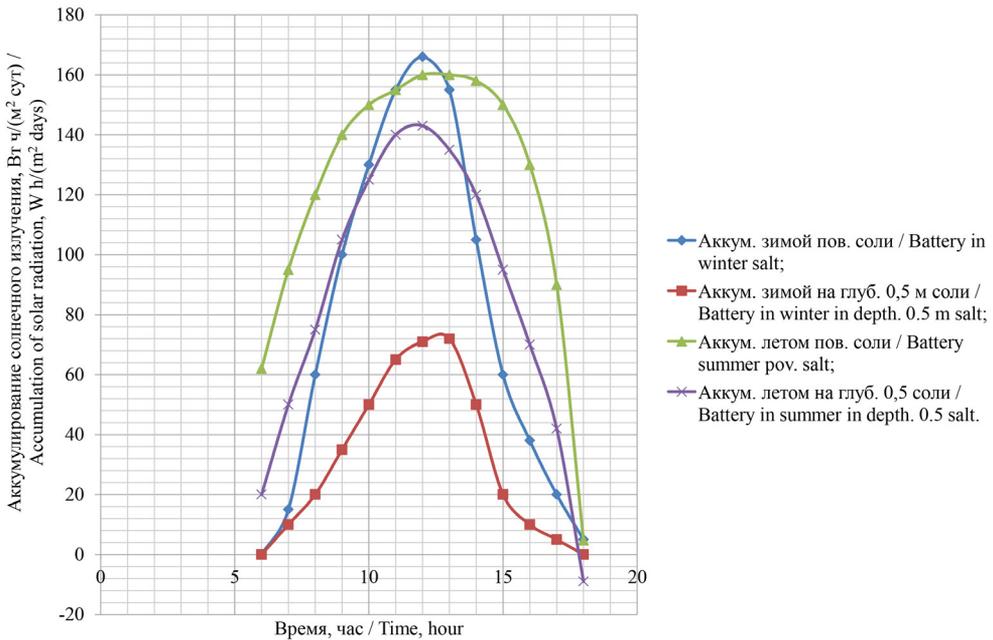
Проделив некоторые аппроксимации степенными полиномами в том же интервале времени с применением преобразования Лапласа и другие математические преобразования, находим температурный режим солевого слоя в водоеме T_c , °C , получаем в виде периодического гармоничного ряда:

$$T_c = T_{0c} + \sum_{j=1}^n T_{jc} \exp\left[i(\omega \tau - \varphi_j)\right],$$

¹² Пенджиев А. М. Научное обоснование использования энергетических технологий на основе возобновляемых источников энергии в Туркменистане : дис. ... д-р. тех. наук. М., ГНУ ВИЭСХ. 2022. *Instruments and methods of experimental physics* 487

где T_{oc} – среднее значение температуры соленой воды водоема, °C; T_{jc} – амплитуда температуры солевого слоя, °C для j – гармоники; $i = \sqrt{-1}$ – мнимое число; ω – циклическая частота внешнего теплового воздействия соленой воды на солевой слой, °C/ч; τ – время, час; φ_j – угол сдвига фаз, радиус. Более детальные расчеты содержатся в работах¹³ [22].

Результаты исследования. На основе составленного теплового балансового уравнения (1) рассчитан термический режим залива как «солнечного пруда» (8). Определены суточный температурный режим на поверхности солевого слоя и на глубине 0,5 м. С помощью формулы (2) обозначили аккумуляцию солнечной энергии в летний и зимний периоды года. Аккумуляция в соленой поверхности и на глубине 0,5 м солеотложения показано на рисунке 6.



Р и с. 6. Суточный ход аккумуляции солнечного излучения в заливе Кара-Богаз-Гол
 Fig. 6. Daily variation of solar radiation accumulation in the Kara-Bogaz-Gol Gulf

Источник: составлено авторами статьи.
 Source: the diagram is compiled according by the authors.

В течение дня солнечное излучение аккумулируется на солевой поверхности и составляет: зимой – 1 009,0 Вт/м² сут. или в среднем – 77,6 Вт/м² сут.; летом – 1 574,7 Вт/м² сут. или в среднем 121,1 Вт/м² сут.; на глубине 0,5 м равно: зимой – 408,0 Вт/м² сут. или в среднем 31,4 Вт/м² сут.; летом – 1 111,0 Вт/м² сут. или в среднем 85,5 Вт/м² сут.

¹³ Пенджиев А. М. Научное обоснование использования энергетических технологий на основе возобновляемых источников энергии в Туркменистане.
 488 Приборы и методы экспериментальной физики

Температура на солевой поверхности зимой составляет от 3,8 до 31,5 °С; летом – от 14,3 до 55,04 °С. Температура на глубине 0,5 м солевой поверхности зимой изменяется в пределах от 3,8 до 15,76 °С; летом – от 7,16 до 27,52 °С. Процесс аккумулирования солнечной энергии связан с температурой прогрева солевой поверхности, которая меняется по сезонам года. Полученные научные исследования соответствуют законам теплофизики и адекватно воспроизводят результаты составленного дифференциального уравнения теплового баланса для промежутка времени.

Статистические показатели для составления ТЭО. Разработка, составление проектно-сметной документации и внедрение солнечных энергетических станций вызывает необходимость технико-экономического обоснования (ТЭО), которое поможет спрогнозировать и определить рентабельность энергетических технологий и их энергоэффективность для потребителя.

Основываясь на методах математической статистики, расчетных результатах мы получили уравнения регрессии и коэффициент корреляции для прогнозирования потенциалов солнечного излучения при преобразовании в тепловую энергию (y), в зависимости от температуры воды и количества аккумулирования солнечной энергии на солевой поверхности (x) и на глубине 0,5 м.

Рассматриваем уравнение регрессии $y = a + bx$, в котором a – начальная ордината, дающая значение y при $x = 0$; b – коэффициент регрессии, он демонстрирует изменение величины y в среднем при изменении x на единицу [2; 5; 6].

На основе многолетних данных солнечного излучения, падающего на поверхность водоема Кара-Богаз-Гол, уравнение регрессии и коэффициент корреляции зимой и летом составляют:

$$\text{зимой на поверхности соли: } y = -4,3956x + 327,75; R^2 = 0,0082;$$

$$\text{летом на поверхности соли: } y = -1,044x + 599,45; R^2 = 0,0002.$$

Зависимость экономических и технических показателей от гелиоизлучения, взятого в среднем за много лет наблюдений, его трансформация в энергию, причем показатели были взяты по месяцам года в регионе Кара-Богаз-Гол, имеет следующий вид:

$$\text{валовый: } y = -0,3332x + 160,19, R^2 = 0,0003;$$

$$\text{технический в тепловую: } y = -0,7073x + 112,64, R^2 = 0,0027;$$

$$\text{удельные энергетические параметры солнечной тепловой:} \\ y = -0,1797x + 116,02, R^2 = 0,0002.$$

Уравнение регрессии и коэффициент корреляции для аккумулирования солнечной энергии на поверхности и глубине 0,5 м соли в водоеме зимой и летом имеют следующий вид:

$$\text{зимой на поверхности соли: } y = -1,1154x + 91; R^2 = 0,0051;$$

$$\text{летом на поверхности соли: } y = -1,5264x + 139,45; R^2 = 0,0161;$$

$$\text{зимой на глубине 0,5 м: } y = -0,5659x + 38,176; R^2 = 0,0066;$$

$$\text{летом на глубине 0,5 м: } y = -1,533x + 103,86; R^2 = 0,0149.$$

Мы получили уравнение регрессии технического потенциала и удельные энергопараметры гелиоизлучения (y), которое, накапливая энергию Солнца в соленом водоеме, преобразует ее в тепловую (x). Данная регрессия поможет специалистам в прогнозировании создания различных технологических установок на основе солнечной энергии и при составлении соответствующей проектной документации и ТЭО для строительства их в регионе Кара-Богаз-Гол.

Обсуждение и заключение. Путем теоретической систематизации информации научных исследований в области использования гелиоустановок, по формализованной методике определены потенциальные возможности и объем снижения антропогенных нагрузок на окружающую среду при условии использования энергетических гелиоустановок для получения тепловой энергии [2].

Полученные научные результаты базируются на физических законах, процессах тепло- и массообмена, математическом анализе залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда», что адекватно воспроизводят результаты математической модели.

Предварительные технико-экономические расчеты показывают, что использование естественного соленого водоема Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» снизит затраты на различные механизированные мероприятия при строительстве гидросооружения, искусственной теплоизоляции дна водоема, так как это существенно повышает себестоимость преобразования тепла. Расчеты, приведенные на рисунках 3 и 4, подтверждают способность достижения необходимой температуры рассола для осуществления снабжения потребителя теплом [17–19]. Результаты показывают, что аккумулятивное накопление солнечной энергии зимой в сутки на глубине 0,5 м в среднем составляет 31,4 Вт/м² сут., летом – 85,5 Вт/м² сут. На солевую поверхность в среднем поступает солнечная энергия: летом – 586,9 Вт ч/м² сут., зимой – 275,0 Вт ч/м² сут. По предварительным расчетам, летом на 1 км² залива можно получить 60 м³ воды со средней температурой 75,0 °С, а зимой – 25,0 °С. Полученные результаты также могут быть использованы в сочетании с тепловыми насосами, данные расчеты могут применяться и на меньшей глубине.

Если обеспечить поступление тепла 60 Вт/м², то вполне достижимо снабжение населения горячей водой в течение года [20–22].

Применение таких методов при строительстве солнечных прудов в рассматриваемом районе более предпочтительно, поскольку при этом не требуются:

- финансовые затраты на строительство котлована, так как залив представляет собой природный бассейн со средней глубиной 4,7 м;
- закупка соли (в заливе создана необходимая концентрация рассола);
- создание службы контроля за процессом содержания соли при снижении температуры.

Все вышеперечисленное существенно снижает эксплуатационные расходы.

На основе исследований и полученных результатов делаем следующие выводы:

- научно обоснованы теплоэнергетические ресурсные потенциалы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда», валовые, технические, экономические и экологи-

ческие показатели от преобразования солнечной энергии в тепловую соответственно составят: 1 978,3 кВт·ч/(м² год); 1 381,7 кВт·ч/(м² год); 552,6 кг у.т.; сокращение выбросов вредных компонентов в атмосферу с 1 м²/ кг в год составят: SO₂ – 11,50; NO_x – 6,22; CO – 0,79; CH₄ – 1,88; CO₂ – 803,73; твердых веществ – 1,17;

– на основе расчета составленной математической модели тепло- массо-обмена потенциалы аккумулирования тепловой энергии составляют зимой 1 009,0 Вт/м² сут., летом – 1 574,7 Вт/м² сут., меняется от 40–70 % в зависимости от сезона года; средняя температура в летний период на солевой поверхности дна поднимается от 55,04 до 79,8 °С, зимой – от 20,0 до 25,6 °С, а КПД аккумулирования глауберовой соли в заливе составит: зимой – 11,4 %, летом – 14,6 %.

Полученные в исследовании научные результаты могут быть с успехом применены для составления проектно-сметной документации и технико-экономического обоснования разработки и внедрения различных систем на основе теплоэнергетических ресурсных потенциалов, в частности, солнечной энергии. Эффективное использование рассматриваемого нами залива Кара-Богаз-Гол в качестве «солнечного пруда» значительно повысит условия жизни местного населения, так как появятся новые рабочие места, улучшится экологическая обстановка в регионе, снизится антропогенная нагрузка на окружающую среду. Все это будет способствовать укреплению экономики и «зеленому» экологическому и социальному развитию страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пенджиев А. М. Экоэнергетический потенциал Туркменистана // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 16–18. С. 133–147. <https://doi.org/10.15518/isjaec.2017.16-18.133-147>
2. Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S. Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution // Aquatic Geochemistry. 2009. Vol. 15. P. 223–236. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9054-z>
3. Пенджиев А. М., Астанов Н. Г. Теоретические и методические расчеты потенциалов солнечно-энергетических ресурсов на Юго-Восточных Каракумах // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 7 (147). С. 65–86. EDN: SCLGTX
4. Penjiyev A. M. Wave Energy Resources of the Caspian Sea on the Coast of Turkmenistan // Applied Solar Energy. 2022. Vol. 58. P. 306–310. <https://doi.org/10.3103/S0003701X22020141>
5. Rghif Y., Colarossi D., Principi P. Salt Gradient Solar Pond as a Thermal Energy Storage System: A Review from Current Gaps to Future Prospects // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 61, Article no. 106776. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106776>
6. Dincer I., Erdemir D. Solar Pond Systems // Solar Ponds: Systems and Applications. 2023. P. 83–122. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45457-8_3
7. Odilova S., Sharipova Z., Azam S. Investing in the Future: A Systematic Literature Review on Renewable Energy and its Impact on Financial Returns // International Journal of Energy Economics and Policy. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 329–337. <https://doi.org/10.32479/ijeep.14375>
8. Пенджиев А. М., Оразов П. О. Солнечный город – Аркадаг // Инженерные системы и сооружения. 2023. № 2 (52). С. 30–38. EDN: MVBRCY
9. Перспективы строительства опытно-промышленного солнечного пруда в Крыму / О. С. Попель [и др.] // Энергетическое строительство. 1992. № 2. С. 9–14.
10. Sodha M. S., Tiwari G. N., Nayak J. K. Shallow Solar Pond Water Heater: An Analytical Study // Energy Conversion and Management. 1981 Vol. 21, Issue 2. P. 137–139. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90035-2)

11. Дубковский В., Денисова А. Использование солнечных прудов в комбинированных энергоустановках // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2000. № 2. С. 11–13. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/5426/> (дата обращения: 25.06.2024).
12. Некоторые результаты теоретического и экспериментального исследования теплового режима соляного солнечного бассейна / Ю. У. Умаров [и др.] // Гелиотехника. 1973. № 2. С. 60–65.
13. Monjezi A. A., Campbell A. N. A Comprehensive Transient Model for the Prediction of the Temperature Distribution in a Solar Pond Under Mediterranean Conditions // *Solar Energy*. 2016. Vol. 135. P. 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.011>
14. Advances in Solar Pond Technology and Prospects of Efficiency Improvement Methods / O. V. Mbelu [et al.] // *Sustainable Energy Research*. 2024. Vol. 11. Article no. 18. <https://doi.org/10.1186/s40807-024-00111-5>
15. Finite Element Modelling of the Thermal Performance of Salinity Gradient Solar Ponds / A. Anagnostopoulos [et al.] // *Energy*, 2020. Vol. 203. Article no. 117861. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117861>
16. Thermal-Salinity Performance and Stability Analysis of the Pilot Salt-Gradient Solar Ponds with Phase Change Material / M. R. Assari [et al.] // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 53. Article no. 102396. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102396>
17. The Investigation of Heat Storage Efficiency of Salt Gradient Solar Pond with and Without Phase Changing Materials / H. Sogukpinar [et al.] // *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2023. Vol. 42, Issue 4. Article no. e14085. <https://doi.org/10.1002/ep.14085>
18. Thermal-Salinity Performance and Stability Analysis of the Pilot Salt-Gradient Solar Ponds with Phase Change Material / M. R. Assari [et al.] // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 53. Article no. 102396. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102396>
19. Monjezi A. A., Campbell A. N. A Comprehensive Transient Model for the Prediction of the Temperature Distribution in a Solar Pond under Mediterranean Conditions // *Solar Energy*. 2016. Vol. 135. P. 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.011>
20. Adediji Y. A Review of Analysis of Structural Deformation of Solar Photovoltaic System under Wind-Wave Load // *Engineering Archive*. 2022. <https://doi.org/10.31224/2273>
21. The Application of an Enhanced Salinity-Gradient Solar Pond with Nucleation Matrix in Lithium Extraction from Zabuye Salt Lake in Tibet / Q. Wu [et al.] // *Solar Energy*. 2022. Vol. 244. P. 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.031>
22. Пенджиев А. М. Математическое моделирование микроклимата в солнечной теплице траншейного типа // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 7. С. 88–96. URL: <https://clck.ru/3Bi4fy> (дата обращения: 25.06.2024).
23. Пенджиев А. М. Основы геоинформационной системы в развитии солнечной энергетики Туркменистана // Наука. Мысль: электронный периодический журнал. 2015. № 12. С. 29–45. URL: <https://clck.ru/3BmGZu> (дата обращения: 25.06.2024).

REFERENCES

1. Penjiyev A.M. Eco-Energy Potential of Turkmenistan. *Alternative Energy and Ecology*. 2017; 16–18:133–147. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.16-18.133-147>
2. Kosarev A.N., Kostianoy A.G., Zonn I.S. Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution. *Aquatic Geochemistry*. 2009;15:223–236. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9054-z>
3. Penjiyev A.M., Astanov N.G. Theoretical and Methodical Calculations of Potential of Solar Power Resources on Southeast Karakum. *Alternative Energy and Ecology*. 2014;7(147):65–86. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: SCLGTX
4. Penjiyev A.M. Wave Energy Resources of the Caspian Sea on the Coast of Turkmenistan. *Applied Solar Energy*. 2022;58:306–310. <https://doi.org/10.3103/S0003701X22020141>

5. Rghif Y., Colarossi D., Principi P. Salt Gradient Solar Pond as a Thermal Energy Storage System: A Review from Current Gaps to Future Prospects. *Journal of Energy Storage*. 2023;61:106776. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106776>
6. Dincer I., Erdemir D. Solar Pond Systems. *Solar Ponds: Systems and Applications*. 2023;83–122. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45457-8_3
7. Odilova S., Sharipova Z., Azam S. Investing in the Future: A Systematic Literature Review on Renewable Energy and its Impact on Financial Returns. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2023;13(4):329–337. <https://doi.org/10.32479/ijeeep.14375>
8. Penjiyev A.M., Orazov P.O. Sunny City – Arkadag. *Engineering Systems and Structures*. 2023;2(52):30–38. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **MVBRCY**
9. Popel O.S., Sonina N.M., Yaskin L.A., Zenkova I.A. Prospects for the Construction of a Pilot Industrial Solar Pond in Crimea. *Energy Construction*. 1992;2:9–14. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Sodha M.S., Tiwari G.N., Nayak J.K. Shallow Solar Pond Water Heater: An Analytical Study. *Energy Conversion and Management*. 1981;21(2):137–139. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90035-2)
11. Dubkovsky V., Denisova A. [Use of Solar Ponds in Combined Power Plants]. *Ecotechnologies and Resource Conservation*. 2000;2:11–13. (In Russ.) Available at: <https://www.nkj.ru/archive/articles/5426/> (accessed 25.06.2024).
12. Umarov Yu.U., Teslenko J.H., Eliseev V.N., Umarov G.Ya. [Some Results of a Theoretical and Experimental Study of the Thermal Regime of a Salt Solar Pool]. *Solar Technology*. (In Russ.) 1973;2:60–65.
13. Monjezi A.A., Campbell A.N. A Comprehensive Transient Model for the Prediction of the Distribution in a Solar Pond Under Mediterranean Conditions. *Solar Energy*. 2016;135:297–307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.011>
14. Mbelu O.V., Adeyinka A.M., Yahya D.I., Adediji Y.B., Njoku H. Advances in Solar Pond Technology and Prospects of Efficiency Improvement Methods. *Sustainable Energy Research*. 2024;11:18. <https://doi.org/10.1186/s40807-024-00111-5>
15. Anagnostopoulos A., Sebastia-Saez D., Campbell A.N., Arellano-Garcia H. Finite Element Modeling of the Thermal Performance of Salinity Gradient Solar Ponds. *Energy*. 2020;203:117861. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117861>
16. Assari M.R., Beik A.J.G., Eydi R., Tabrizi H.B. Thermal-Salinity Performance and Stability Analysis of the Pilot Salt-Gradient Solar Ponds with Phase Change Material. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;53:102396. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102396>
17. Sogukpinar H., Bozkurt I., Genc, Z.K., Karakilcik M. The Investigation of Heat Storage Efficiency of Salt Gradient Solar Pond with and Without Phase Changing Materials. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2023;42(4):e14085. <https://doi.org/10.1002/ep.14085>
18. Assari M.R., Beik A.J.G., Eydi R., Tabrizi H.B. Thermal-Salinity Performance and Stability Analysis of the Pilot Salt-Gradient Solar Ponds with Phase Change Material. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022;53:102396. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102396>
19. Monjezi A.A., Campbell A.N. A Comprehensive Transient Model for the Prediction of the Distribution in a Solar Pond under Mediterranean Conditions. *Solar Energy*. 2016;135:297–307. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.011>
20. Adediji Y. A Review of Analysis of Structural Deformation of Solar Photovoltaic System under Wind-Wave Load. *Engineering Archive*. 2022. <https://doi.org/10.31224/2273>
21. Wu Q., Yu J., Bu L., Nie Z., Wang Y., Renchen N., et al. The Application of an Enhanced Salinity-Gradient Solar Pond with Nucleation Matrix in Lithium Extraction from Zabuye Salt Lake in Tibet. *Solar Energy*. 2022;244:104–114. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.031>
22. Penjiyev A.M. Mathematical Modeling of the Microclimate in Solar Hot-House Deepof Type. *ISSAEE*. 2010;7:88–96. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://clck.ru/3Bi4fy> (accessed 25.06.2024).
23. Penjiyev A.M. [Osnovnye Geoinformacionnye Sistemy v Razvitii Solnechnoj Jenergetiki Turkmenistana]. *A Science. Thought: Electronic Periodic Journal*. 2015;12:29–45. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3BmGZu> (accessed 25.06.2024).

Об авторах:

Пенджиев Ахмет Мырадович, доктор технических наук, доктор сельскохозяйственных наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов Туркменского государственного архитектурно-строительного института (744025, Туркменистан, г. Ашхабад, ул. Б. Аннанова, 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6584-5851>, Scopus ID: 57203910120, ampenjiyev@gmail.com

Оразов Парухат Оразмухамедович, кандидат технических наук, ректор Туркменского государственного архитектурно-строительного института. (744025, Туркменистан, г. Ашхабад, ул. Б. Аннанова, 1), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8361-4523>, tdbgi@online.tm

Заявленный вклад авторов:

А. М. Пенджиев – формирование основной концепции, научное руководство, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, корректировка литературного анализа, доработка текста.

П. О. Оразов – анализ результатов исследований и обсуждение, формирование и корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 20.11.2023; поступила после рецензирования 22.01.2024;
принята к публикации 29.01.2024*

About the author:

Ahmet M. Penjiyev, Doctor of Technical Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes of the Turkmen State Institute of Architecture and Construction (1 B. Annanova St., 744025 Ashgabat, Turkmenistan), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6584-5851>, Scopus ID: 57203910120, ampenjiyev@gmail.com

Parahat O. Orazov, Candidate of technical sciences, rector of the Turkmen State Institute of Architecture and Civil Engineering, (1 B. Annanova St., 744025 Ashgabat, Turkmenistan), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8361-4523>, tdbgi@online.tm

Authors contribution:

A. M. Penjiyev – developing the basic concept, academic advising, formulating goals and objectives of the study, making calculations, preparing the text, the literary analysis, finalizing the text.

P. O. Orazov – analysis and discussion of the study results, developing the study conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 20.11.2024; revised 22.01.2024; accepted 29.01.2024