

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-551-564>

УДК 621.383; 581.582:574.23

Залив Кара-Богаз-Гол как «солнечный пруд» и его энергетические характеристики

А. М. Пенджиев¹⁾, Б. М. Мамедов¹⁾

¹⁾Туркменский государственный архитектурно-строительный институт
(Ашхабад, Туркменистан)

Реферат. В статье рассмотрены солнечные энергетические ресурсы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда». С использованием разработанных физических и математических методов определены его тепловые энергетические потенциалы аккумуляирования солевых отложений залива для создания и использования энергетических технологий в отраслях промышленности. Оценены тепловые энергетические характеристики для внедрения различных солнечных энергетических аккумулярующих технологий. По предварительным расчетам, КПД солнечного водоема составляет зимой 1,14 %, летом 1,46 %. Солнечный энергетический потенциал преобразования в тепловую энергию меняется в пределах от 40 до 70 % в зависимости от сезона года. Средняя температура на солевой поверхности дна водоема составляет: в летний период – от 55,04 до 79,8 °С, в зимний – от 20,0 до 25,6 °С. Полученные научные результаты могут быть использованы при разработке проектно-сметной документации, составлении технико-экономического обоснования для создания различных солнечно-энергетических технологических комплексов в зоне Каспийского региона, которые будут содействовать укреплению энергетической безопасности, развитию энергетических систем и производству автономных технологических установок, оборудования на основе солнечной энергии, что снизит энергопотребление органического топлива и улучшит экологическую обстановку в регионе Кара-Богаз-Гола.

Ключевые слова: солнечная энергетика, энергетические потенциалы, солнечный пруд, гидрометеорологические особенности, математическая статистика, залив Кара-Богаз-Гол, Каспийское море, Туркменистан

Для цитирования: Пенджиев, А. М. Залив Кара-Богаз-Гол как «солнечный пруд» и его энергетические характеристики / А. М. Пенджиев, Б. М. Мамедов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. Т. 68, № 6. С. 551–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-551-564>

Kara-Bogaz-Gol Bay as a “Solar Pond” and Its Energy Characteristics

A. M. Penjiyev¹⁾, B. M. Mamedov¹⁾

¹⁾ Turkmen State Institute of Architecture and Civil Engineering, (Ashgabat, Turkmenistan)

Abstract. The article considers the solar energy resources of the Kara-Bogaz-Gol Bay as a “solar pond”. Using the developed physical and mathematical methods, the thermal energy potentials

Адрес для переписки

Пенджиев Ахмет Мырадович
Туркменский государственный
архитектурно-строительный институт
ул. Б. Аннанова, д. 136,
744001, г. Ашхабад, Туркменистан
Тел.: +7 (993) 65-80-17-54
ampenjiyev@gmail.com

Address for correspondence

Penjiyev Ahmet M.
Turkmen State Institute
of Architecture and Construction
136, B. Annanova str.,
744001, Ashgabat, Turkmenistan
Tel.: +7 (993) 65-80-17-54
ampenjiyev@gmail.com

of the accumulation of salt deposits in the bay were determined for the creation and use of energy technologies in industrial sectors. Thermal energy characteristics for the introduction of various solar energy storage technologies were assessed; according to preliminary calculations, the efficiency of a solar reservoir is 1.14 % in winter and 1.46 % in summer. The solar energy potential of conversion into thermal energy varies from 40 to 70 % depending on the season of the year. The average temperature on the salt surface of the reservoir bottom in summer ranges from 55.04 to 79.8 °C, in winter from 20.0 to 25.6 °C. The obtained scientific results can be used in the development of design and estimate documentation, preparation of feasibility studies for the creation of various solar energy technological complexes in the Caspian region, which will contribute to strengthening energy security, development of energy systems and production of autonomous technological installations and equipment based on solar energy, which will reduce the energy consumption of fossil fuels and improve the environmental situation in the Kara-Bogaz-Gol region.

Keywords: solar energy, energy potentials, solar pond, hydrometeorological features, mathematical statistics, Kara-Bogaz-Gol Bay, Caspian Sea, Turkmenistan

For citation: Penjyiev A. M., Mamedov B. M. (2025) Kara-Bogaz-Gol Bay as a “Solar Pond” and Its Energy Characteristics / *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (6), 551–564. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-551-564> (in Russian)

Введение

Для реализации государственных программ по энергосбережению, направленных на повышение энергоэффективности во всех отраслях экономики, конкурентоспособности национальной экономики, предусмотрены модернизация и техническое перевооружение предприятий, внедрение современных ресурсосберегающих технологий с использованием новейших научно-технических разработок, совершенствование систем учета потребления энергоресурсов и охраны окружающей среды [1–3].

Национальная стратегия по развитию возобновляемой энергетики в Туркменистане до 2030 г. предусматривает меры по использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в электроэнергетике по направлениям развития – экспорт; местное потребление в рамках, согласованных с энергосистемами; электроснабжение потребителей в отдаленных районах страны.

Проведенный анализ используемых в мировой практике систем энерго- и теплоснабжения на основе ВИЭ показывает, что к наиболее перспективным технологиям для применения в Туркменистане относятся: энерго- и водоснабжение небольших рассредоточенных населенных пунктов и фермерских хозяйств; сеть «солнечных» водопойных пунктов на природных пастбищах Каракумов; ветровые и солнечные установки для энергоснабжения удаленных поселков от линии электропередачи; энергосберегающие «солнечные» дома для фермерских хозяйств; солнечные технологические системы отопления и горячего водоснабжения. Исходя из этого использование и применение в энергопроизводстве технологических систем, оборудования на основе ВИЭ является актуальной задачей [1–6].

Среди ВИЭ перспективным для Туркменистана является использование солнечной энергии. По расчетам, технический потенциал энергии Солнца эквивалентен $1,4 \cdot 10^9$ т у. т. в год. Одним из экзотических способов исполь-

зования солнечной энергии является «солнечный пруд». Солёный водоем – это солнечный коллектор, в котором аккумулируется значительное количество энергии Солнца [7, 8].

Многими учеными проделана определенная работа по изучению данного вопроса. В своих научных трудах авторы рассмотрели: дизайн и перспективы использования прудов; физику тепловых процессов неглубоких «солнечных прудов» (использование их для обогрева промышленных предприятий); анализировали переходной процесс в неглубоких прудах с применением солнечных водонагревательных коллекторов; определили выработку электроэнергии в солнечных прудах в штате Калифорния и др. [5–25].

Туркменскими учеными проведена большая научно-исследовательская работа и достигнуты значительные результаты по использованию солнечной энергии в народном хозяйстве. Вопросы аккумулирования энергии в солёном водоеме как источнике теплоты недостаточно исследованы, не сформулированы рекомендации по реализации освоения энергетических потенциалов как аккумулятора теплоты «солнечных прудов» в природно-климатических условиях Туркменистана, который обладает значительными возобновляемыми энергетическими ресурсными потенциалами. Для разработки и внедрения различных солнечно-энергетических технологий необходимо составить технико-экономическое обоснование (ТЭО) с целью обоснования целесообразности внедрения проекта. В приведенных работах энергетические ресурсные потенциалы залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» в Каспийском море не рассмотрены [26, 27].

Залив Кара-Богаз-Гол богат химическими элементами для использования в различных отраслях промышленности, полученные энергетические ресурсные потенциалы повысят энергоэффективность химического производства, понизят энергозатраты, тем самым снизят себестоимость продукции, уменьшат вредные выбросы в биосферу, улучшат социально-бытовые, экономические и экологические условия жизнедеятельности населения. Основываясь на обзоре литературы, определены цели и задачи исследования залива Кара-Богаз-Гол как природного источника энергии «солнечный пруд».

Цель исследования – оценить ресурсные потенциалы солнечного излучения залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» с целью использования и внедрения различных солнечных энергетических технологий для тепло- и энергосбережения в Каспийском регионе.

Научная новизна – исследованы многолетние гидрометеорологические наблюдения, природно-климатические условия, составлена математическая модель тепло- и массообмена залива, методами математической статистики определена корреляционная зависимость, составлено уравнение регрессии для данных климатических условий. Определены и рассчитаны солнечные ресурсные потенциалы аккумулирования тепловой энергии и КПД солнечного излучения, предложена солнечная электростанция и другие энергетические технологии для внедрения в регионе залива Кара-Богаз-Гол.

Исследование основывается на законах физики, теплофизики, термодинамики и методах теплотехнических преобразований. Залив Кара-Богаз-Гол рассмотрен как «солнечный пруд». Предметом исследования является солнечная энергия, а водоем Кара-Богаз-Гол – как тепловой аккумулятор. Методологическую основу составляют полученные ресурсные потенциалы солнечной энергии как аккумулятора теплоты для теплоснабжения потребителей залива Кара-Богаз-Гол.

Гидрометеорологические и химические особенности солевых элементов залива Кара-Богаз-Гол

На юго-востоке Туркменистана на побережье Каспийского моря в соленом заливе Кара-Богаз-Гол солнечное излучение аккумулируется в воде и солевых залежах как тепловой аккумулятор. Площадь залива составляет примерно 18 тыс. км², средняя глубина 4,7 м, местами изменяется от 2,2 до 6,2 м [11, 17, 28, 29].

Концентрация соли в заливе составляет 310 ‰ (в некоторых местах даже доходит до 350 ‰), высока также концентрация глауберовой соли, или мирабилита. Мирабилит представляет собой большой интерес для различных отраслей промышленности. Мирабилит – унаследованный минерал – это прозрачные кристаллы в форме призм, на вкус горький, тает на языке, не имеет запаха, хорошо растворим в воде, не горит. Химическая формула $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, твердость 1,5–2,0 по шкале Мооса; плотность 1,49 г/см³ [20]. При длительном нахождении на воздухе или при нагревании выпаривается (вываривается) и теряет массу. При полном выветривании становится обычным сульфатом натрия – порошком белого цвета. Кроме самой десятиводной глауберовой соли известны ромбические кристаллы семиводного кристаллогидрата $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и одноводная соль $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [11].

Глауберова соль впервые обнаружена химиком И. Р. Глаубером в составе минеральных вод, а впоследствии синтезирована действием серной кислоты на хлорид натрия, ее применяли в стекольном и содовом производстве и заготавливали растворы для использования в медицине.

Средний температурный режим залива изменяется от 0,9 °С зимой и до 26 °С летом. Максимальная температура летом доходит до 64 °С, средняя минимальная зимой снижается до –3 °С [13, 27, 29]. Температурный режим воды в заливе отличается от Каспийского моря: если средняя температура воды моря составляет 13,5 °С в год, то на заливе она равна 16,9 °С. Количество осадков на территории залива в среднем составляет 104 мм в течение года, в среднем в месяц 8,7 мм, число дней в году без осадков 54, или в месяц 8,6 дня.

Рассчитанные систематизированные ресурсные солнечно-энергетические потенциалы для залива Кара-Богаз-Гол составляют, кВт·ч/(м²·год): валовые – 1685,4; технические, преобразованные в тепловую энергию – 1177,1; в электрическую – 222,1; экономические от преобразования в теп-

ловую энергию – 470,9 и электрическую – 89,1 кг у. т./($\text{м}^2 \cdot \text{год}$). Продолжительность солнечного сияния в год на заливе равна 222,8 ч, или в среднем составляет 7,8 ч в сутки, пасмурные дни наблюдаются примерно 2,65 сут. в год. Ветровой режим меняется по сезонам года – в зимний период повышается и составляет в среднем 6,2 м/с, а летом снижается до 5,7 м/с. Результаты гидрометеорологических наблюдений графически приведены на рис. 1 [11–14, 17, 27, 29].

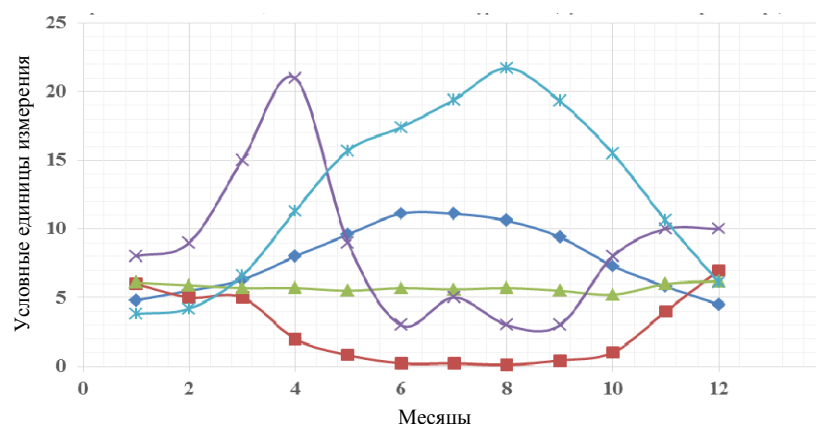


Рис. 1. Метеорологические наблюдения залива Кара-Богаз-Гол по месяцам года:
—♦— продолжительность сияния, ч; —■— количество пасмурных дней, сут.;
—▲— скорость ветра, м/с

Fig. 1. Meteorological observations of the Kara-Bogaz-Gol Bay by months of the year:
—♦— duration of radiance, h; —■— Number of cloudy days, day;
—▲— wind speed, m/s

Солнечно-энергетические особенности залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда»

Энергетические особенности работы «солнечного пруда» заключаются в следующем: солнечное излучение поступает на водную поверхность водоема, часть отражается в окружающую среду, а часть проникает в водоем и попадает в нижний солевой слой, более плотный и концентрированный, который не смешивается с верхним. Это позволяет удерживать тепловую энергию. Иначе говоря, «солнечный пруд» – это накопитель солнечной энергии [25].

Процесс формирования теплоэнергетического режима аккумуляирования в соленом водоеме очень сложный. Однако в отдельных частных 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 режимов в солевой воде (на аккумуляирование 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 перечисленных факторов.

Методика гидротехнических исследований по динамике теплообмена позволяет сформулировать основные черты упрощенной модели: водоем как система в пространстве, однородно заполненная хорошо перемешанной соленой водой, полуограниченный в водяном массиве; боковые ограждения с нулевой теплоемкостью; солнечное излучение, равномерно распространяющееся по воздушному, водному и солевому пространству залива.

Экспериментальные исследования, как известно, ввиду локального характера полученных данных, а также ввиду различий в методике проведения и обработки данных эксперимента довольно часто не могут быть обобщены и бывают весьма противоречивы. В связи с этим большой интерес вызывают теоретические исследования.

Исходя из этого на основе физического принципа и процесса тепло- и массообмена составлено дифференциальное уравнение теплового энергетического баланса с учетом влияющих факторов: метеорологических (солнечное излучение, температура воздуха, воды, соли, скорость ветра, облачность и др.); термических и теплотехнических характеристик соли, воды (теплопроводность, теплоемкость, плотность, прозрачность, альbedo) для залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда». Тепловое балансовое уравнение за промежуток времени $d\tau$ имеет вид

$$dQ_p^\Sigma - dQ_c - dQ_b - dQ_{th} - dQ_{av} - dQ_{ac} - dQ_{bg} = 0, \quad (1)$$

где dQ_p^Σ – суммарный поток теплоты солнечного излучения, поступающий в солнечный водоем залива, кВт·ч/м²; dQ_{av} – поток солнечного излучения, аккумулированный в водоеме, кВт·ч/м²; dQ_c – то же, поглощенного солевой поверхностью дна пруда и почвой, кВт·ч/м²; dQ_b – то же, поступающий в водную поверхность водоема, кВт·ч/м²; dQ_{th} – количество теплоты, отдаваемой в атмосферу с поверхности в результате воздухообмена и теплопередачи, кВт·ч/м²; dQ_{bg} – то же, отдаваемой в боковые грунтовые поверхности водоема в одномерном пространстве на один квадратный метр (объем не учитываем), $dQ_{bg} \approx 0$ кВт·ч/м²; dQ_{ac} – поток солнечного излучения, аккумулированный соевым слоем на дне, кВт·ч/м² [25, 30–34].

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

$$dQ_p = (1 - r_b) F q^* (\tau) d\tau; \quad (2)$$

$$dQ_c = c_c \gamma_c \xi_c \rho_c F [(T_c(\tau) - T_b(\tau))] d\tau; \quad (3)$$

$$dQ_b = c_b \gamma_b \xi_b \rho_b F [(T_b(\tau) - T_h(\tau))] d\tau; \quad (4)$$

$$dQ_{th} = c_b \gamma_b \xi_b \rho_b F [(T_b(\tau) - T_h(\tau))] d\tau; \quad (5)$$

$$dQ_{ab} = c_b \gamma_b \rho_b F dT_b(\tau); \quad (6)$$

$$dQ_{ac} = c_c \gamma_c \rho_c F dT_c(\tau), \quad (7)$$

где F – площадь водоема, m^2 ; c_b – объемная теплоемкость соленой воды, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; γ_b – плотность соленой воды, kg/m^3 ; q^* – поток солнечного излучения на горизонтальную поверхность, $kJ \cdot m^{-2}$.

Проделив некоторые математические преобразования, находим температурный режим солевого слоя в водоеме T_c , $^\circ C$, в виде периодического гармонического ряда

$$T_c = T_{0c} + \sum_{j=1}^n T_{jc} \exp[i(\omega\tau - \varphi_j)], \quad (8)$$

где T_{0c} – среднее значение температуры соленой воды водоема, $^\circ C$; T_{jc} – амплитуда температуры солевого слоя, $^\circ C$, для j -й гармоники; $i = \sqrt{-1}$ – мнимое число; ω – циклическая частота внешнего теплового воздействия соленой воды на солевой слой, $град./ч$; τ – время, $ч$; φ_j – угол сдвига фаз, $град$. Подробное математическое преобразование приведено в работах [3, 30, 32, 33].

Результаты исследования

На основе составленного уравнения теплового балансового (1) рассчитан термический режим залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» (8). Определены суточные температурные режимы на поверхности солевого слоя и на глубине 0,5 м, с помощью формулы (7) определяем аккумулярование солнечной энергии в летний и зимний периоды года. На рис. 2 приведены результаты расчета суточного аккумулярования солнечного излучения в заливе.

Анализируя графические результаты, делаем выводы, что в течение дня солнечное излучение аккумуляруется и составляет:

- на солевой поверхности зимой – $1009,0 \text{ Вт}/(m^2 \cdot \text{сут.})$, или в среднем $77,6 \text{ Вт}/(m^2 \cdot \text{сут.})$; летом – $1574,7 \text{ Вт}/(m^2 \cdot \text{сут.})$, или в среднем $121,1 \text{ Вт}/(m^2 \cdot \text{сут.})$;

- на глубине 0,5 м зимой – $408,0 \text{ Вт}/(m^2 \cdot \text{сут.})$, или в среднем $31,4 \text{ Вт}/(m^2 \cdot \text{сут.})$; летом – $1111,0 \text{ Вт}/(m^2 \cdot \text{сут.})$, или в среднем $85,5 \text{ Вт}/(m^2 \cdot \text{сут.})$.

Температура изменяется:

- на солевой поверхности зимой – от $3,8$ до $31,5 \text{ }^\circ C$; летом – от $14,3$ до $55,04 \text{ }^\circ C$;

– на глубине 0,5 м зимой – в пределах от 3,8 до 15,76 °С; летом – от 7,16 до 27,52 °С.

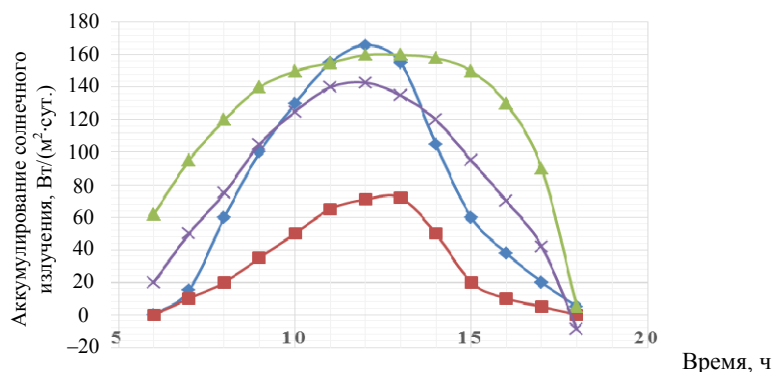


Рис. 2. Суточный ход аккумуляции солнечного излучения в заливе Кара-Богаз-Гол:

— зимой 0 пов. соли; — зимой 0,5 м глубине;
— летом 0 пов. соли; — летом 0,5 м глубине

Fig. 2. Daily course of solar radiation accumulation in the Karak-Bogaz-Gol Bay:

— 0 table salt in winter; — at 0.5 m depth in winter;
— 0 table salt in summer; — at 0.5 m depth in summer

Процесс аккумуляции солнечной энергии связан с температурой прогрева солевой поверхности слоя, которая меняется по сезонам года. Полученные результаты исследования с использованием составленного дифференциального уравнения теплового баланса для промежутка времени соответствуют законам теплофизики и адекватно воспроизводятся.

Методика статистического анализа. Для разработки, составления проектно-сметной документации и внедрения солнечных энергетических станций возникает необходимость технико-экономического обоснования для прогноза и определения рентабельности энергетических технологий и их энергоэффективности для потребителя.

Используя методы математической статистики, на основании расчетных результатов получены уравнения регрессии и коэффициент корреляции для прогнозирования потенциалов солнечного излучения при преобразовании в тепловую энергию в зависимости от температуры воды и количества аккумуляции солнечной энергии на солевой поверхности и глубине 0,5 м.

Рассмотрим уравнение регрессии $y = a + bx$, где a – начальная ордината, которая дает значение y при $x = 0$; b – коэффициент регрессии, который демонстрирует изменение величины y в среднем при изменении x на единицу [7, 10, 33].

Определим зависимость экономических и технических показателей от гелиоизлучения, взятого в среднем за много лет наблюдений, его трансформацию в энергию, причем показатели были взяты по месяцам года в регионе Кара-Богаз-Гол.

Уравнение регрессии и коэффициент корреляции для аккумуляции солнечной энергии составляют:

– на поверхности соли:

$$\text{зимой} \quad y = -1,1154x + 91; R^2 = 0,0051; \quad (9)$$

$$\text{летом} \quad y = -1,5264x + 139,45; R^2 = 0,0161; \quad (10)$$

– на глубине 0,5 м:

$$\text{зимой} \quad y = -0,5659x + 38,176; R^2 = 0,0066; \quad (11)$$

$$\text{летом} \quad y = -1,533x + 103,86; R^2 = 0,0149. \quad (12)$$

Среднесуточное излучение в январе и июле на солевой поверхности:

$$\text{зимой} \quad y = -4,3956x + 327,75; R^2 = 0,0082; \quad (13)$$

$$\text{летом} \quad y = -1,044x + 599,45; R^2 = 0,0002. \quad (14)$$

Полученные методами математического моделирования процессов тепло- и массообмена уравнения регрессии позволяют рассчитать ТЭО для создания различных солнечно-энергетических станций и в других странах.

Энергетическая станция на прудах. Во многих государствах, таких как Венгрия, Индия, Италия, Израиль, США, Япония, получены значительные успехи в научно-исследовательских работах по повышению энергоэффективности «солнечных прудов». Например, в конце 80-х гг. прошлого столетия на берегу Мертвого моря в Эй-н-Бокеке построена солнечная станция на принципе «солнечный пруд» с площадью 7400 м² электрической мощностью 150 кВт, где стоимость 1 кВт·ч электроэнергии равна 10 центам США, т. е. ее себестоимость вполне конкурентоспособна с традиционной [3, 7, 10–15, 28–30].

Рассмотрим возможность строительства энергетической станции на принципе «солнечного пруда» в условиях залива Кара-Богаз-Гол в Каспийском море. Технологическая схема энергетической станции «солнечный пруд» для залива Кара-Богаз-Гол представлена на рис. 3.

Принцип работы электростанции «солнечный пруд» заключается в следующем: из слоя 2 горячая вода поступает в теплообменник 4 (испаритель), где расположен парогенератор, при помощи насоса 8. В парогенераторе низкотемпературный пар поступает в виде низкокипящей жидкости в турбину 5, которая приводит в движение электрогенератор 6. После турбины пар отправляется в конденсатор 7, куда направляется и холодная вода из водоема 3 при помощи насоса 8. Эта схема работает в замкнутом цикле. Энергоэффективность данной системы зависит от перепадов температуры между слоями горячей 2 и холодной 3 воды. Данный принцип не отличается от парогенераторных электростанций [3, 7–15, 20, 23, 25, 30].

Средняя температура в летний период на солевой поверхности дна поднимается от 55,04 до 79,8 °С, зимой опускается до 20 °С. Температура поверхности водоема зимой не выше средней температуры наружного воздуха и в январе равна 3,8 °С, а на поверхности водоема 3,4 °С, летом соответственно 21,7 и 30,5 °С.

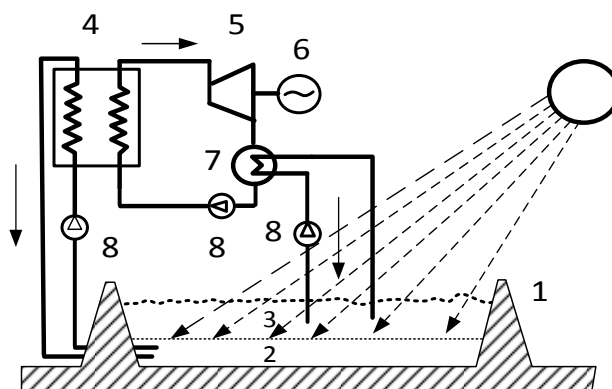


Рис. 3. Солнечная электростанция на заливе Кара-Богаз-Гол как «солнечном пруде»:
1 – дамба; 2 – горячая вода с высокой концентрацией соли; 3 – охлажденная вода;
4 – теплообменник; 5 – турбина; 6 – электрогенератор; 7 – конденсатор; 8 – насосы

Fig. 3. Solar power plant on the Kara-Bogaz-Gol Bay as a “solar pond”:

1 – dam; 2 – hot water with a high concentration of salt; 3 – chilled water;

4 – heat exchanger; 5 – turbine; 6 – electric generator; 7 – capacitor; 8 – pumps

По предварительным расчетам, летом на 1 км^2 залива можно получить 60 м^3 воды со средней температурой $75,0 \text{ }^\circ\text{C}$, а зимой – $25,0 \text{ }^\circ\text{C}$. На сегодняшний день в мировой практике используются ряд соленых озер и морей с искусственными «солеными прудами» для производства теплоты, этот процесс относится к классу активных солнечных систем.

Из мирового опыта известно, что возникают проблемы при создании турбин, работающих при низких давлениях и температурах, усилении вращения электрогенератора с увеличением размера, при поступлении в газогенератор воды с высокой концентрацией соли (вызывает серьезные проблемы с коррозионной стойкостью данных устройств) [7, 10–16, 19–22].

Предварительные технико-экономические расчеты. Использование естественного соленого водоема Кара-Богаз-Гол позволяет сократить затраты на различные механизированные мероприятия при строительстве гидросооружения, искусственной теплоизоляции дна водоема, так как это существенно повышает себестоимость преобразования теплоты. Возможность получения повышенной температуры рассола, пригодного для обеспечения прямого теплоснабжения, для потребителя приведена в расчетах на рис. 1, 2. Результаты показывают, что аккумулялирование солнечной энергии зимой в сутки на глубине $0,5 \text{ м}$ в среднем составляет $31,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$, летом – $85,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$, на солевую поверхность в среднем поступает летом $586,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$ солнечной энергии, зимой – $275,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$. Полученные результаты расчетов также могут быть использованы на меньшей глубине при комбинации с тепловыми насосами.

Например, при тепловой нагрузке $60 \text{ Вт}/\text{м}^2$ возможно обеспечивать потребителей горячей водой в течение всего года. Такой вариант строительства «солнечных прудов» в заливе Кара-Богаз-Гол в сравнении с традиционным имеет многие преимущества, так как не требуются:

- расходы на рытье котлована, поскольку глубина залива в среднем составляет $4,7 \text{ м}$, в данном случае 1 м ;

- затраты на соль, создание большого градиента концентрации рассола;
- процедура контроля поддержания заливом солесодержания при сниженных градиентах температуры.

Все перечисленное выше существенно снижает эксплуатационные расходы.

ВЫВОДЫ

1. Оценены ресурсные потенциалы солнечного излучения залива Кара-Богаз-Гол как «солнечного пруда» для использования и внедрения различных солнечных энергетических технологий для энергосбережения в Каспийском регионе.

2. Полученные научные результаты обоснованы на базе физических законов, процессов тепло- и массообмена, математического анализа залива как «солнечного пруда», что адекватно воспроизводит результаты математической модели.

3. Оценены тепловые энергетические характеристики для внедрения различных солнечных энергетических аккумулирующих технологий. Предварительно КПД зимой составит 1,14 %, летом – 1,46 %. Мощность аккумулирования солнечной энергии в среднем составляет: на солевой поверхности 1 м² летом – 586,9 Вт/(м²·сут.), зимой – 275,0 Вт/(м²·сут.); на глубине солевой залежи 0,5 м зимой – 31,4 Вт/(м²·сут.), летом – 85,5 Вт/(м²·сут.).

4. Мощность системы заряда и разряда солнечной батареи на солевой поверхности меняется по сезонам года: заряжается летом (август) до 70 %, разряжается зимой (январь) до 40 %. Средняя температура солевой поверхности дна в летний период поднимается от 55,04 °С (май) до 79,8 °С (в сентябре) и снижается зимой до 20,0 °С (в январе) и начинает подниматься в марте до 25,6 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердымухамедов, Г. М. Туркменистан на пути достижения целей устойчивого развития / Г. М. Бердымухамедов. Ашхабад: Туркменская государственная изд. служба, 2018. 468 с.
2. Бердымухамедов, Г. М. Электроэнергетическая мощь Туркменистана / Г. М. Бердымухамедов. Ашхабад: Туркменская государственная изд. служба, 2022. 130 с.
3. Пенджи́ев, А. М. Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии / А. М. Пенджи́ев. М.: Русайнс, 2023. 400 с.
4. Седнин, А. В. Проблемы развития гибридных систем теплоснабжения / А. В. Седнин, К. М. Дюсенов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188>.
5. Прогнозирование часов пик энергопотребления региональных энергосистем / С. Р. Саитов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 1. С. 78–91. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-78-91>.
6. Письменная, У. Е. Устойчивые энергетические трансформации: нивелирование негативных экстерналий / У. Е. Письменная, Г. С. Трипольская // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 4. С. 312–327. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-312-327>.
7. Солнечная энергетика: учеб. пособие для вузов / В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина, В. А. Кузнецова, Н. К. Малинин; под общ. ред. В. И. Виссарионова. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 276 с.
8. Даффи, Д. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Д. А. Даффи, У. А. Бекман. М.: Мир, 1977. 429 с.

9. Дубковский, В. Использование солнечных прудов в комбинированных энергоустановках / В. Дубковский, А. Денисова // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2000. № 2. С. 11–13.
10. Стребков, Д. С. Основы солнечной энергетики / Д. С. Стребков; под ред. П. П. Безруких. М.: САМ Полиграфист, 2019. 326 с.
11. Кара-Богаз-Гол: как все были уверены, что именно это озеро убивает Каспийское море // Энциклопедия географа. URL: <https://enciclopedia-geografa.ru/puteshestviya/6016-kara-bogaz-gol-kak-vse-byli-uvereny-chto-imenno-eto-ozero-ubivaet-kaspiyskoe-more.html> <https://enciclopedia-geografa.ru/puteshestviya/6016-kara-bogaz-gol-kak-vse-byli-uvereny-chto-imenno-eto-ozero-ubivaet-kaspiyskoe-more.html>.
12. Некоторые результаты теоретического и экспериментального исследования теплового режима соляного солнечного бассейна / Ю. У. Умаров, Л. Н. Тесленко, В. Н. Елисеев, Г. Я. Умаров // Гелиотехника. 1973. № 2. С. 37–42.
13. Анализ тепловых характеристик и конвективной устойчивости солнечного пруда / О. С. Попель, С. Е. Фрид, Е. М. Шелков [и др.] // Тр. Европейского симпозиума по солнечной энергии. Варна, НРБ. 13–17 сентября 1983. С. 27.
14. Попель, О. С. Исследование систем теплоснабжения на основе солнечных прудов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.08 / О. С. Попель; АН СССР. Ин-т высоких температур. М.: ИВТАН, 1988.
15. Перспективы строительства опытно-промышленного солнечного пруда в Крыму / О. С. Попель, Н. М. Сони́на, Л. А. Яскин, И. А. Зенкова // Энергетическое строительство. 1992. № 2. С. 9–14.
16. Kosarev A.N. Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution / A. N. Kosarev, A. G. Kostianoy, I. S. Zonn // Aquatic Geochemistry. 2009. Vol. 15. P. 223–236. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9054-z>.
17. Dickinson, W. C. Shallow Solar Ponds for Industrial Process Heat: the ERDA–SOHIO project (No. UCRL-78288; CONF-760821-4) / W.C. Dickinson, A. F. Clark, A. Iantuono. California Univ., Livermore (USA). Lawrence Livermore Lab., 1976.
18. Kudish, A. I. Compact Shallow Solar Pond Hot Water Heater / A. I. Kudish, D. Wolf // Solar Energy. 1978. Vol. 21, № 4. P. 317–322. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(78\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0038-092x(78)90008-7).
19. Sodha, M. S. Physics of Shallow Solar Pond Water Heater / M. S. Sodha, J. K. Navak, S. C. Kaushik // International Journal of Energy Research. 1980. Vol. 4, No 4. P. 323–337. <https://doi.org/10.1002/er.4440040404>.
20. Sodha, M. S. Shallow Solar Pond Water Heater: an Analytical Study / M. S. Sodha, G. N. Tiwari, J. K. Nayak // Energy Conversion and Management. 1981. Vol. 21, No 2. P. 137–139. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90035-2).
21. Merriam, M. F. Electricity Generation from Non-Convective Solar Ponds in California: Report of University Wide energy Research Group (UER 109) / M. F. Merriam. University of California, Universitywide Energy Research Group, 1983.
22. Abou-Chakra, F. N. Analyses of the Sources, Factors and Treatment Methods Affecting Turbidity at the El Paso Solar Pond: Theses Masters Science / F. N. Abou-Chakra. The University of Texas at El Paso, 1992.
23. Popel, O. S. A Generalized Stationary Model for Solar Pond / O. S. Popel // Proc. of ISES Solar World Congress. Hamburg: ERG, 1987. P. 243–247.
24. Popel, O. S. Solar Ponds: the State of the Art of R&D Efforts / O. S. Popel // Development and Use of Effective Solar Systems: H-ISES Workshop. Budapest, Hungary, 2–3 June 1988.
25. Popel, O. S. The Models of Processes for Converting the Solar Energy in Solar Ponds and Their Practical Utilization / O. S. Popel, E. E. Shpilrain, S. E. Frid // North Sun'88. Solar Energy at High Latitudes: Proc. of the Int. Conf. Borlange, Sweden, 29–31 August, 1988.
26. Использование солнечной энергии / под общ. ред. Л. Е. Рыбаковой. Ашхабад: Ылым, 1985. 280 с.
27. Стребков, Д. С. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане / Д. С. Стребков, А. М. Пенджиев, Б. Д. Мамедсахатов. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012. 498 с.
28. Penjiyev, A. M. Solar Energy Resource Potential of the Garabogazköl Gulf in the Caspian Sea / A. M. Penjiyev, P. O. Orazov // Geography and Natural Resources. 2025. Vol. 46, No 2. P. 212–219. <https://doi.org/10.1134/s1875372825700234>.
29. Penjiyev, A. M. Wave Energy Resources of the Caspian Sea on the Coast of Turkmenistan / A. M. Penjiyev // Applied Solar Energy. 2022. Vol. 58, No 2. P. 306–310. <https://doi.org/10.3103/s0003701x22020141>.

30. Байрамов, Р. Б. Математическая модель для описания теплового режима гелиотеплицы траншейного типа / Р. Б. Байрамов, Л. Е. Рыбакова, А. М. Пенджиев // Гелиотехника. 1985. № 4. С. 41–44.
31. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3: Многолетние данные. Л.: Гидрометеиздат, 1989. Вып. 30: Туркменская ССР / Туркменское респ. упр. по гидрометеорологии. 500 с.
32. Пенджиев, А. М. Агротехника выращивания дынного дерева (*Carica papaya* L.) в условиях защищенного грунта в Туркменистане: автореф. дис. ... докт. сельхоз. наук: 06.03.01 / А. М. Пенджиев; Московский государственный ун-т леса. М., 2000. 54 с.
33. Пенджиев, А. М. Математическое моделирование микроклимата в солнечной теплице траншейного типа / А. М. Пенджиев // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 7. С. 88–96.
34. Пенджиев, А. М. Научное обоснование использования энергетических технологий на основе возобновляемых источников энергии в Туркменистане: автореф. дис. ... докт. тех. наук: 05.14.08 / А. М. Пенджиев; Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. Ашхабад, 2022. 42 с.

Received: 23 July 2025 Accepted: 25 September 2025 Published online: 28 November 2025

REFERENCES

1. Berdimuhamedov G. M. (2018) *Turkmenistan on the Way to Achieving Sustainable Development Goals*. Ashgabat, Turkmen State Publishing Service. 468 (in Russian).
2. Berdimuhamedov G. M. (2022) *Electric Power Capacity of Turkmenistan*. Ashgabat, Turkmen State Publishing Service. 130 (in Russian).
3. Penjiyev A. M. (2023) *Eco-Energy Resources of Renewable Energy Sources*. Moscow, Russia Publ. 400 (in Russian).
4. Sednin A. V., Dyussenov K. M. (2024) Development of Hybrid District Heating Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188> (in Russian).
5. Saitov S. R., Chichirova N. D., Filimonova A. A., Karnitsky N. B. (2024) Forecasting Peak Hours for Energy Consumption in Regional Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (1), 78–91. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-78-91> (in Russian).
6. Pysmenna U. Ye., Trypolska G. S. (2020) Sustainable Energy Transitions: Overcoming Negative Externalities. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 312–327. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-312-327>.
7. Vissarionov V. I., Deryugina G. V., Kuznetsova V. A., Malinin N. K. (2008) *Solar Energy*. Moscow, Publishing House of Moscow Power Engineering Institute. 276 (in Russian).
8. Duffie J. A., Beckman W. A. (1974) *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc. Published. 429.
9. Dubkovsky V., Denisova A. (2000) Use of Solar Ponds in Combined Power Plants. *Ekotekhnologii i Resursoberezhenie = Ecotechnologies and Resource Saving*, (2), 11–13.
10. Strebkov D. S. (2019) *Fundamentals of Solar Energy*. Moscow, Publishing House SAM Poligraphist Publ. 326 (in Russian).
11. Kara-Bogaz-Gol: How Everyone Was Sure That This Lake Was Killing the Caspian Sea // *Enciklopediya Geografa [Encyclopedia of the Geographer]*. URL: <https://enciklopediya-geografa.ru/puteshestviya/6016-kara-bogaz-gol-kak-vse-byli-uvereny-chto-imenno-eto-ozero-ubivaet-kaspiyskoe-more.html> <https://enciklopediya-geografa.ru/puteshestviya/6016-kara-bogaz-gol-kak-vse-byli-uvereny-chto-imenno-eto-ozero-ubivaet-kaspiyskoe-more.html> (in Russian).
12. Umarov Yu. U., Teslenko L. N., Eliseev V. N., Umarov G. Ya. (1973) Some Results of Theoretical and Experimental Study of the Thermal Regime of a Salt Solar Pool. *Geliotekhnika = Applied Solar Energy*, (2), 37–42 (in Russian).

13. Popel O. S., Fried S. E., Shelkov E. M. [et al.] (1983) Analysis of Thermal Characteristics and Convective Stability of a Solar Pond. *Proceedings of the European Symposium on Solar Energy*. Varna, NRB, September 13–17, 27 (in Russian).
14. Popel O. S. (1988) *Study of Heat Supply Systems Based on Solar Ponds* [Dissertation]. Moscow, Institute for High Temperatures of Academy of Sciences (in Russian).
15. Popel O. S., Sonina N. M., Yaskin L. A., Zenkova I. A. (1992) Prospects for the Construction of a Pilot Solar Pond in Crimea. *Energeticheskoe Stroitel'stvo* [Energy Construction], (2), 9–14 (in Russian).
16. Kosarev A. N., Kostianoy A. G., Zonn I. S. (2008) Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution. *Aquatic Geochemistry*, 15(1–2), 223–236. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9054-z>.
17. Dickinson W. C., Clark A. F., Iantuono A. (1976) *Shallow Solar Ponds for Industrial Process Heat: the ERDA-SOHIO project (No. UCRL-78288; CONF-760821-4)*. California Univ., Livermore (USA). Lawrence Livermore Lab.
18. Kudish A. I., Wolf D. (1978) A compact shallow solar pond hot water heater. *Solar Energy*, 21 (4), 317–322. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(78\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0038-092x(78)90008-7).
19. Sodha M. S., Nayak J. K., Kaushik S. C. (1980) Physics of shallow solar pond water heater. *International Journal of Energy Research*, 4 (4), 323–337. <https://doi.org/10.1002/er.4440040404>.
20. Sodha M. S., Tiwari G. N., Nayak J. K. (1981) Shallow solar pond water heater: An analytical study. *Energy Conversion and Management*, 21 (2), 137–139. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(81\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0196-8904(81)90035-2).
21. Merriam M. F. (1983) *Electricity Generation from Non-Convective Solar Ponds in California: Report of University Wide energy Research Group (UER 109)*. University of California, Universitywide Energy Research Group (in Russian).
22. Abou-Chakra F. N. (1992) *Analyses of the Sources, Factors and Treatment Methods Affecting Turbidity at the El Paso Solar Pond*: Theses Masters Science. The University of Texas at El Paso.
23. Popel O. S. (1987) A Generalized Stationary Model for Solar Pond. *Proc. of ISES Solar World Congress*. Hamburg, ERG, 243–247.
24. Popel O. S. (1988) Solar Ponds: the State of the Art of R&D Efforts. *Development and Use of Effective Solar Systems: H-ISES Workshop*. Budapest, Hungary, 2–3 June 1988.
25. Popel O. S., Shpilrain E. E., Frid S. E. The Models of Processes for Converting the Solar Energy in Solar Ponds and Their Practical Utilization. *North Sun'88. Solar Energy at High Latitudes: Proc. of the Int. Conf.* Borlange, Sweden, 29–31 August, 1988.
26. Rybakova L. E. (ed.) (1985) *Use of Solar Energy*. Ashgabat, Ylym Publ. 280 (in Russian).
27. Strebkov D. S., Penjiyev A. M., Mamedsakhmatov B. D. (2012) Development of solar energy in Turkmenistan. Moscow, State Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture”. 498 (in Russian).
28. Penjiyev A. M., Orazov P. O. (2025) Solar Energy Resource Potential of the Garabogazköl Gulf in the Caspian Sea. *Geography and Natural Resources*, 46 (2), 212–219. <https://doi.org/10.1134/s1875372825700234>.
29. Penjiyev A. M. (2022) Wave Energy Resources of the Caspian Sea on the Coast of Turkmenistan. *Applied Solar Energy*, 58 (2), 306–310. <https://doi.org/10.3103/s0003701x22020141>.
30. Bayramov R. B., Rybakova L. E., Penjiyev A. M. (1985) Mathematical Model for Describing the Thermal Regime of a Trench-Type Solar Greenhouse. *Geliotekhnika = Applied Solar Energy*, (4), 41–44 (in Russian).
31. Turkmen Republican Department of Hydrometeorology (1989) *Scientific and Applied Reference Book on the Climate of the USSR. Series 3. Long-term data. Issue 30: Turkmen SSR*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 502 (in Russian).
32. Penjiyev A. M. (2000) Agricultural Technology for Growing Melon Trees (*Carica Papaya* L.) in Protected Soil Conditions in Turkmenistan [Dissertation]. Moscow. 54 (in Russian).
33. Penjiyev A. M. (2010) Mathematical Modeling of Microclimate in a Solar Trench-Type Greenhouse. *Alternativnaya Energetika i Ekologiya = Alternative Energy and Ecology*, (7), 88–96 (in Russian).
34. Penjiyev A. M. (2022) Scientific Substantiation of the Use of Energy Technologies Based on Renewable Energy Sources in Turkmenistan [Dissertation]. Ashgabat. 42 (in Russian).

Поступила 23.07.2025 Подписана в печать 25.09.2025 Опубликована онлайн 28.11.2025