

ГЕОГРАФИЯ ЗА РУБЕЖОМ

УДК 621.383; 581.582:574.23

DOI: 10.15372/GIPR20250217

А.М. ПЕНДЖИЕВ, П.О. ОРАЗОВ

Туркменский государственный архитектурно-строительный институт,
744001, Ашхабад, ул. Баба Аннанова, 136, Туркменистан,
ampenjiyev@gmail.com, ampenjiyev@rambler.ru

ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЗАЛИВА КАРА-БОГАЗ-ГОЛ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

Использование природных экологически чистых ресурсов в инженерных системах, в частности, солнечных энергетических технологий, способствует уменьшению энергозатрат, тем самым снижая себестоимость продукции и антропогенную нагрузку на окружающую среду. Изучены многолетние гидрометеорологические данные, которые обработаны методами математической статистики, определена достоверность взаимодействия и получены уравнения регрессии для прогноза природно-климатических условий побережья зал. Кара-Богаз-Гол в Каспийском море. Рассмотрены природные гелиоэнергетические ресурсные потенциалы побережья залива. С помощью инновационных методик ставится задача 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. Для разработки, создания и внедрения солнечных тепловых и электрических станций на исследуемой территории по инновационной методике с учетом природно-климатических условий и атмосферных явлений оценены валовые, технические, экономические и экологические возможности региона. Дана оценка солнечно-энергетическим потенциалам фотопреобразователя и теплового коллектора при оптимальном угле наклона на основании теоретических исследований и методических расчетов, с учетом продолжительности солнечного сияния; часового угла к наклонной и нормально ориентированной поверхности; движения солнечного склонения на наклонную поверхность и к горизонту; рассеяния излучения, альбедо, угловых параметров прихода и солнечного излучения; среднемесячной и годовой температуры наружного воздуха и работы солнечной установки; удельных энергетических параметров солнечной установки и др. Полученные научно-обоснованные и систематизированные результаты могут быть использованы при разработке проектно-сметной документации, составлении технико-экономического обоснования для создания различных гелиотехнологических комплексов в прикаспийском регионе, которые будут содействовать укреплению энергетической безопасности, устойчивому развитию энергосистем при использовании автономных технологических установок на основе солнечной энергии, росту производства природных химических элементов, снижению энергопотребления органического топлива и улучшению экологической обстановки в регионе зал. Кара-Богаз-Гол.

Ключевые слова: природно-климатические ресурсы, солнечное излучение, энергетические потенциалы, экологический аспект, математическая статистика, технико-экономическое обоснование.

A.M. PENJIYEV, P.O. ORAZOV

Turkmen State Institute of Architecture and Construction,
744001, Ashgabat, ul. Baba Annanova, 136, Turkmenistan, ampenjiyev@gmail.com, ampenjiyev@rambler.ru

SOLAR ENERGY RESOURCE POTENTIAL OF THE KARA-BOGAZ-GOL GULF IN THE CASPIAN SEA

The use of natural environmentally friendly resources in engineering systems, in particular, solar energy technologies, helps to cut energy costs, thereby reducing production costs and anthropogenic load on the environment. Long-term hydrometeoro-

logical data were studied and processed using mathematical statistics methods, the reliability of the interaction was determined, and regression equations were obtained to predict the natural and climatic conditions along the coast of the Kara-Bogaz-Gol Gulf in the Caspian Sea. Natural solar energy resource potentials of the gulf coast were considered. Using innovative techniques, the task is to assess the thermal resource potentials of solar radiation; consider the salt deposits of the gulf as heat accumulators for the development, implementation and application of solar thermal energy technologies; and justify the technical and economic feasibility of their use in engineering systems in the gulf. For development, creation and implementation of solar thermal and electric power stations in the study area applying innovative methods with consideration of natural and climatic conditions and atmospheric phenomena, gross, technical, economic and environmental capabilities of the region were assessed. The solar energy potentials of photoconverter and heat collector at the optimum tilt angle were estimated based on theoretical studies and methodological calculations, taking into account duration of sunshine; hour angle to inclined and normally oriented surface; movement of solar declination to an inclined surface and to the horizon; scattering of radiation, albedo, angular parameters of arrival and solar radiation; average monthly and annual temperature of outdoor air and operation of a solar installation; specific energy parameters of a solar installation, etc. The obtained scientifically substantiated and systematized results can be used in the development of design and estimate documentation, preparation of feasibility studies for the creation of various solar technology complexes in the Caspian region, which will contribute to strengthening of energy security, sustainable development of energy systems when using autonomous technological units based on solar energy, growth of production of natural chemical elements, reduction of energy consumption of organic fuel, and improvement of the environmental situation in the region of the Kara-Bogaz-Gol Gulf.

Keywords: *natural and climatic resources, solar radiation, energy potentials, environmental aspect, mathematical statistics, feasibility study.*

ВВЕДЕНИЕ

В Государственной программе по энергосбережению на 2018–2024 гг. и Национальной программе социально-экономического развития Туркменистана на 2022–2052 гг. поставлены следующие цели: способствовать бережному и рациональному использованию природных ресурсов, повысить энергоэффективность и конкурентоспособность национальной экономики, сохранить окружающую среду и обеспечить благоприятные социально-бытовые условия для населения [1].

Для реализации национальных, государственных программ энергосбережения, социально-экономического и экологического развития страны принят Закон Туркменистана «О возобновляемых источниках энергии» (ВИЭ) [2]. Закон определяет правовую, организационную, экономическую, социальную и финансовую основы, механизмы регулирования отношений государства, производителей, поставщиков и потребителей ВИЭ, оборудования для производства, установок и технологий.

Энергообеспечение труднодоступных и отдаленных районов за счет возобновляемых источников является актуальной проблемой. В морском секторе Каспийского моря с помощью различных энергетических технологий и установок возможно получать тепловую и электрическую энергии посредством использования таких источников возобновляемой энергии, как солнце, ветер, волны, приливы и отливы.

В юго-восточной части побережья Каспийского моря находится богатый минералами залив Кара-Богаз-Гол, который относится к гетерогенной группе водоемов с разнообразной по химическому составу рапой: карбонатные, сульфатные, хлоридные, натриевые, хлормagneйные, поликальциевые, олигокальциевые, литиевые и многие другие элементы. В настоящее время у ученых очень большой интерес вызывают недостаточно изученные альгоценозы [1, 3, 4].

Для развития промышленности, малого и среднего бизнеса, получения различных ценных химических элементов для отраслей промышленности необходимо энерговоодообеспечение. Одним из приоритетных и энергетически эффективных направлений является использование энергетических ресурсов возобновляемых источников энергии залива. Но для оценки рентабельности производства необходима разработка проектно-сметной документации и технико-экономическое обоснование (ТЭО) для строительства возобновляемых энергетических инженерных сооружений. В данном случае мы рассматриваем гелиотехнические энергетические сооружения для автономного электрообеспечения малых производственных хозяйств, населенных пунктов зал. Кара-Богаз-Гол в Каспийском море [1, 3–5].

Цель данного исследования — рассчитать экономический и экологический потенциалы для разработки ТЭО, создания и внедрения различных солнечно-энергетических технологий в зал. Кара-Богаз-Гол Каспийского моря. При этом поставлены задачи по оценке валовых, технических, экономических и экологических гелиоэнергетических ресурсных потенциалов и определению достоверности взаимодействия уравнения регрессии и корреляционных коэффициентов для прогноза природно-климатических условий побережья зал. Кара-Богаз-Гол в Каспийском море.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Географические и гидрометеорологические особенности зал. Кара-Богаз-Гол. Использование солнечного-энергетических ресурсных потенциалов будет приоритетным, перспективным, экологически чистым и экономически выгодным вариантом энергоснабжения Каспийского региона [3–5].

Название Кара-Богаз-Гол в переводе с туркменского языка означает «озеро-черная пасть». Местные жители называют залив «Аджи-Дерья», т. е. «горько-соленая вода». Он представляет собой лагуну Каспийского моря, находится на западе Туркменистана и соединяется с морем проливом шириной около 200 м. Площадь водного зеркала меняется от сезона года и примерно равна около 18 000 км², находится ниже уровня Каспийского моря на 28 м [6], соленость залива изменчива — от 40 до 270 ‰ в разных его частях [7], средняя глубина составляет 4,7 м, в некоторых местах с колебаниями от 2,2 до 6,2 м [8].

Прямое солнечное излучение на горизонтальную поверхность при ясном небе в Туркменистане в год составляет 146–154 ккал/см², или 1699,4–1793,0 кВт·ч/(м²·год), а суммы рассеянного излучения при чистом небе — 32–39 ккал/см², или 372,3–453,0 кВт·ч/(м²·год), в пасмурные дни облачность снижает прямое излучение Солнца на 27–35 %, в то же время увеличивается рассеянное излучение на 25–40 %. На всей территории Туркменистана солнечное излучение изменяется в пределах от 145 до 163 ккал/см², или 1687,7–1897,2 кВт·ч/(м²·год) [5, 9–11].

Солнечный энергетический баланс в зал. Кара-Богаз-Гол варьирует в пределах от 44 до 50 кВт·ч/(м²·мес). Суммарное солнечное излучение на горизонтальной поверхности равно 1685,4 кВт·ч/(м²·год), среднее месячное составляет 140,45 кВт·ч/(м²·мес). Продолжительность солнечного сияния в течение года в заливе равна 2192 ч, среднее месячное составляет 182,6 ч/мес. [3, 11, 12].

Температурный режим воздуха в заливе меняется по сезонам года, средняя температура колеблется в пределах от 0,9 до 26,4 °С: в мае она составляет 18,6 °С и держится до октября 21,6 °С, в январе снижается до 0,9 °С. По метеорологическим данным [9, 10], средняя максимальная температура воздуха в январе равна 5 °С, в июле она доходит до 64 °С, средняя минимальная температура опускается в январе до –3 °С, в июле до 22 °С, соответственно, средняя температура в течение года составляет: 13,55 (февраль); 19,75 (январь); 9,25 °С (март) [5, 9, 10] (рис. 1).

Из-за большой меридиональной протяженности Каспийского моря и различных типов атмосферной циркуляции в заливе температура воды и ветровой режим разнообразны. Они обусловлены различиями природно-климатических условий и синоптическими ситуациями. Температуры воды и воздуха, направления течения воды, скорости ветра (рис. 2) изменяются по месяцам в течение года в различных пределах [3, 10, 11].

Научно-исследовательский обзор показывает, что режим штормовых ветров формируется поразному в зависимости от характера рельефа местности и циркуляции атмосферного воздуха. Средняя скорость ветра в заливе меняется в пределах от 5,2 до 6,2 м/с, средняя скорость за год равна 5,7 м/с. При этом иногда фиксируются сильные штормовые ветра, когда скорость ветра достигает 25 м/с и более. Роза ветров над заливом меняется в зависимости от циркуляции атмосферного воздуха по сезонам года [4, 10, 12].

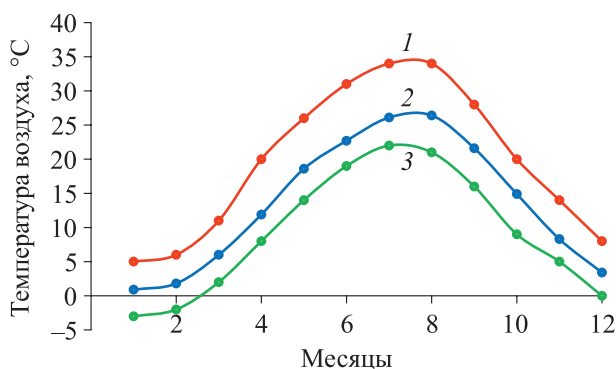


Рис. 1. Распределение максимальной (1), средней (2), минимальной температур воздуха (3) зал. Кара-Богаз-Гол по месяцам в течение года, °С.

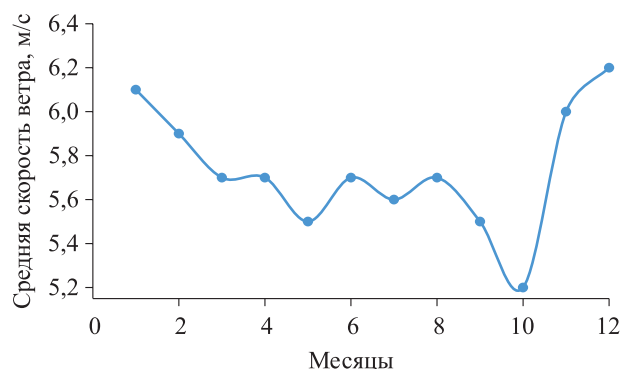


Рис. 2. Распределение средней скорости ветра в зал. Кара-Богаз-Гол по месяцам в течение года, м/с.

Методология и методы исследования залива основываются на системном подходе с применением теоретических и практических расчетных данных, а также с использованием энергетических технологий на основе солнечно-энергетических ресурсных потенциалов для устойчивого развития этой зоны. Методологическую основу составили полученные эмпирические расчеты для составления ТЭО и создания, разработки и внедрения энергоустановок на основе солнечно-энергетических технологий в различных отраслях и хозяйствах зал. Кара-Богаз-Гол в Каспийском море.

Научная новизна работы заключается в том, что в ходе нее были проанализированы многолетние гидрометеорологические наблюдения, обоснованы технико-экономические, экологические ресурсные потенциалы для внедрения солнечно-энергетических установок, методами математической статистики получены уравнения регрессии, выявлены корреляционные коэффициенты по сезонной изменчивости для залива Кара-Богаз-Гол в Каспийском море, рассчитаны валовые, технические, экономические солнечно-энергетические потенциалы.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЗАЛИВА

При составлении проектно-сметной документации и ТЭО для строительства различных солнечных энергетических сооружений и облегчения работы инженеров, сметчиков и проектировщиков необходимы гидрометеорологические данные местности (см. рис. 1) с количественными оценками их распределения. Для их получения были использованы методы математической статистики, данные аппроксимировали в упрощенную диаграмму рассеивания с помощью математического уравнения в линейной зависимости в форме корреляционного эллипса. В прямоугольной системе координат уравнение регрессии прямой линии в виде функции:

$$Y = a + bx,$$

где a — определяет отрезок линии оси Y (температуры), b — изменение Y при изменении X (по месяцам) на единицу коэффициента регрессии. Аналогично было составлено уравнение регрессии средней, максимальной, минимальной температур, продолжительности солнечного сияния, скорости ветра, продолжительности пасмурных дней, количества осадков, температуры почвы для прогнозирования и расчета коэффициента корреляции, определяющего количественную оценку и тесноту связи переменных величин. Полученные результаты приведены в виде уравнений (1–9).

При определении тесной взаимосвязи двух величин средней, максимальной и минимальной температур воздуха x и по месяцам года y в качестве меры взаимосвязи использовали нахождение коэффициента корреляции R . В результате коэффициенты корреляции для зал. Кара-Богаз-Гол в течении года R^2 равны: для средней температуры воздуха по месяцам года — 0,0886; для средней максимальной температуры — 0,0746; для средней минимальной температуры — 0,085; для солнечного сияния — 0,007; для продолжительности солнечного сияния — 0,0188; для средней скорости ветра — 0,0081; для пасмурных дней — 0,0311; для осадков — 0,0877; для температуры почвы — 0,0416 [2, 10, 12].

Логическим продолжением корреляционного анализа является регрессионный анализ, который углубляет представление о корреляционной связи и устанавливает формы зависимости между случайной величиной y . Такая зависимость определяется математической моделью или уравнением регрессии, содержащей несколько неизвестных параметров.

Уравнения регрессии можно применить для технико-экономического обоснования и расчета мощности отопительных приборов, при вычислении тепловых потерь в различных климатических условиях в ходе строительства энергетических станций или сооружений [13, 14].

Важный этап регрессионного анализа — это математическое выражение, связывающее значение зависимой случайной величины y и значение независимой величины x . В результате получается значение (y) зависимой переменной средней температуры, максимальной и минимальной температур воздуха и значение (x) независимой переменной, т. е. фактор, влияющий на признак. Уравнения регрессии для средней, максимальной, минимальной температур воздуха равны:

$$\text{средней} \quad y = 0,7818x + 8,4682; \quad (1)$$

$$\text{максимальной} \quad y = 0,8217x + 14,409; \quad (2)$$

$$\text{минимальной} \quad y = 0,7308x + 4,5. \quad (3)$$

На основании научно-климатических справочников [12] и данных, предоставленных государственной метеорологической службой [10], аналогичным образом получены уравнения регрессий для времени солнечного сияния, продолжительности солнечного сияния, средней скорости ветра, количества пасмурных дней, количества осадков и температуры почвы по месяцам года:

$$\text{для времени солнечного сияния} \quad y = 0,0573x + 7,46; \quad (4)$$

$$\text{для продолжительности солнечного сияния} \quad y = 3,3776x + 200,88; \quad (5)$$

$$\text{для скорости ветра} \quad y = -0,007x + 5,7788; \quad (6)$$

$$\text{для пасмурных дней} \quad y = -0,1262x + 3,4621; \quad (7)$$

$$\text{для количества осадков} \quad y = -0,4336x + 11,485; \quad (8)$$

$$\text{для температуры почвы} \quad y = 0,6538x + 12,0. \quad (9)$$

Таким образом, с помощью полученных уравнений регрессии (1–9) можно прогнозировать предел промежуточного изменения в течение года средней температуры воздуха, продолжительности солнечного сияния, количества пасмурных дней и осадков, температуры почвы и скорость ветра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Степень разработанности темы. Большой вклад в развитие солнечной энергетики внесли известные ученые, такие как П.П. Безруких, В.И. Виссарионов, В.М. Евдокимов, Д.С. Стребков, С.У.А. Бекман, Д.А. Даффи, Дж. Твайдел, А. Ангстром, М. Гиин, Х.Л. Веглей и многие другие [15–21].

Туркменскими учеными также проделана значительная работа в области использования солнечной энергии и достигнуты весомые научно-практические результаты. Недостаток данных научных исследований — это отсутствие систематизации ресурсных солнечно-энергетических потенциалов с учетом природно-климатических условий областей страны. Регионы Каспийского моря на территории Туркменистана практически не рассматривались, хотя они обладают значительным объемом возобновляемых энергетических ресурсов. Одним из приоритетных направлений является использование солнечных энергоэффективных технологий, для определения рентабельности их внедрения необходимо ТЭО [3, 15, 16].

Полученные солнечно-энергетические ресурсные потенциалы будут способствовать развитию прибрежных территорий зал. Кара-Богаз-Гол, улучшению социально-экономических и бытовых условий жизни, развитию среднего и малого бизнеса, созданию новых рабочих мест, снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду в данном регионе Каспийского моря [3–9].

Исходя из вышеприведенных особенностей и приоритетов по использованию солнечно-энергетических технологий, определены цели и задачи исследования энергетических ресурсов солнечной энергии для побережья залива.

Технико-экономические и экологические факторы ресурсного потенциала солнечной энергии. За основу расчета природного ресурсного потенциала солнечной энергии была взята методика авторов, учитывающая условия Каспийского региона. До настоящего времени исследования новыми методами с учетом природно-климатических условий, гидрометеорологических факторов и расчетов для оценки технических, экономических потенциалов и экологических показателей в регионах Туркменистана не проводились [1, 3–9].

При определении солнечно-энергетических ресурсов в заливе учтены все метеорологические факторы солнечного излучения в течение года по месяцам: продолжительность солнечного сияния; часовой угол к наклонной и нормально ориентированной поверхности; движения солнечного склона на наклонную поверхность и к горизонту; рассеяние излучения, альбедо, угловые параметры прихода и солнечного излучения; среднемесячная и годовая температуры наружного воздуха и работы солнечной установки; удельные энергетические параметры солнечной установки и др.

Для расчета приняты некоторые допущения. Например, площадь залива представляется как участок с интенсивно поступающим солнечным излучением на поверхности. Географические, природно-

климатические условия характеризуются однородными средними многолетними данными по всей площади побережья зал. Кара-Богаз-Гол [4, 11–16].

Валовый потенциал — среднеемноголетнее суммарное солнечное излучение, поступающее на прибрежные районы зал. Кара-Богаз-Гол в течение года. Для расчета ресурсного валового потенциала учтены все вышеприведенные гидрометеорологические факторы солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность на протяжении многих лет, и систематизированные по месяцам в течение года, E_i ($i = 1, 2, \dots, 12$) [3–9, 17, 18].

Средний параметр $\cos \theta$ наклона прямого солнечного излучения к нормали и месячный приход к нормально ориентированной поверхности рассмотрен в течение 10 ч составляет от 7 до 17 ч дня. Среднеемноголетнее солнечное излучение (E_{0i}) при безоблачном небе на единицу горизонтальной поверхности по месяцам года рассчитано по формуле

$$E_{0Pi} = \frac{E_{Pi}}{\langle \cos \theta \rangle} = \frac{(1 - \varepsilon) E_i}{\langle \cos \theta \rangle} = 1900,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 \cdot \text{год}, \quad (10)$$

где E_{Pi} — среднеемноголетний приход прямого потока солнечного излучения на единицу горизонтальной поверхности по месяцам года, кВт·ч/м²·мес.); E_i — среднеемноголетний приход солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности по месяцам в течение года, кВт·ч/м²·мес.); $\cos \theta$ — средний параметр угла наклона и месячный приход прямого солнечного излучения на нормально ориентированную поверхность меняется в пределах от 26° летом до 56° зимой; оптимальный угол наклона за год равна 41°; ε — коэффициент излучения, аналогично меняется от 0,14 до 0,28, среднее годовичное равно 0,221667 [3–9, 16, 19].

Суммарное солнечное излучение (E) за 10 часов в сутки, от 7 до 17 ч на единицу горизонтальной поверхности в год равно:

$$E = \sum_i E_i = 1685,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{год}. \quad (11)$$

В итоге валовый потенциал солнечного излучения (W_B) на квадратный метр площади территории прибрежных районов Кара-Богаз-Гол составляет:

$$W_B = ES = 1685,4 \cdot S \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{год}), \quad (12)$$

где S — площадь, м².

Технический потенциал суммарного многолетнего солнечного излучения получается в результате его преобразования в энергию с учетом экологических норм в течение одного года. В нашем случае технический потенциал солнечного излучения представляет сумму технических потенциалов при преобразовании солнечного излучения в тепловую и электрическую энергии [2, 11, 14, 19].

При вычислении технического потенциала тепловой энергии от солнечного излучения использовались следующие исходные параметры: температура воды $T = 60$ °С; технические характеристики интенсивности и теплоотдачи солнечного теплового коллектора: коэффициент эффективного поглощения $F(\tau\alpha) = 0,9$, $FU_L = 0,005$ кВт/(м²·°С); среднемесячная температура T_{0i} , °С; широта местности φ , угол склонения δ и продолжительность солнечного сияния, изменяющегося в течение i -го месяца, t_{Ci} , ч/мес., число ясных, полупасмурных часов и продолжительность рабочего времени t_{Pi} , ч/мес. [3–9, 14, 20].

Технический ресурсный потенциал теплового коллектора, W_{TTi} , приходящегося на единицу отводимой площади, S_T в течение рабочего периода времени от 7 до 17 ч, равен:

$$\begin{aligned} W_{TT} &= \sum_i \frac{W_{TTi}}{S_T} = \sum_i E_i F \left[(\tau\alpha) - U_L (T - T_{0i}) \cos(\varphi - \delta) \frac{t_{Pi}}{E_i} \right] = \\ &= \sum_i W_{TTi} = 1177,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 \cdot \text{год}. \end{aligned} \quad (13)$$

Суммирование по всем месяцам определяет потенциал солнечной тепловой энергии W_{TT} за 10 ч в сутки:

$$W_{TT} = 1177,1 \cdot S_T \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{год}, \quad (14)$$

где S_T — площадь, отводимая под солнечные тепловые установки, м².

Что касается вычисления технического потенциала электроэнергии, полученной от преобразования солнечного излучения, технические характеристики для расчета кремниевых солнечных фото-моделей, интенсивность, КПД, градиенты температуры, коэффициент теплоотдачи приняты как: $\alpha = 0,97$; $\eta_1 = 0,13$; $\chi = 0,004 \text{ K}^{-1}$; $T_1 = 298 \text{ K}$; $\lambda = 40 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$ [3, 4, 20–22].

Результат расчетного значения среднемесячной рабочей температуры, T_i , равен:

$$T_i = \frac{\frac{E_i}{t_{pi}} [\alpha - \eta_1 (1 + \chi T_i)] + \langle \lambda \rangle T_{oi}}{\langle \lambda \rangle - \frac{E_i}{t_{pi}} \eta_1 \chi}. \quad (15)$$

Значение месячных технических потенциалов при оптимальном угле наклона 41° солнечного фотопреобразователя $W_{T\Phi i}$ на единицу площади S_Φ равно:

$$\sum_i \frac{W_{T\Phi i}}{S_\Phi} = \sum_i E_i \eta_1 [1 - \chi (T_i - T_1)] = \sum_i W_{T\Phi i} = 222,65 \cdot S_\Phi \text{ кВт} \cdot \text{ч/год} \quad (16)$$

Потенциал $W_{T\Phi}$ суммированием по всем площадям:

$$W_{T\Phi} = 222,65 \cdot S_\Phi, \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}. \quad (17)$$

Экономический потенциал солнечной энергии представляет собой величину преобразования солнечного излучения в тепловую и электрическую энергию в регионе зал. Кара-Богаз-Гол в течение года. Представленные результаты экономически оправданы для территории вокруг залива при существующем уровне цен на энергоносители, получаемых от преобразования традиционных источников энергии, в переводе на тонны условного топлива (т у. т.) с учетом экологических норм.

При расчете экономического потенциала солнечной энергии за основу взяты температура горячей воды $T_g = 60^\circ \text{C}$ и температура холодной воды $T_x = 15^\circ \text{C}$; технические характеристики и параметры солнечных коллекторов: $F(\tau\alpha) = 0,9$; $F \cdot U_L = 0,005 \text{ кВт/(м}^2 \cdot ^\circ \text{C)}$; норма расхода воды $m = 100 \text{ кг/(чел} \cdot \text{сут.)}$; цена коллектора $C = 400 \text{ долл/м}^2$; $T_{CL} = 15 \text{ лет}$; теплоемкость воды $c_p = 4,17 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ \text{C)}$ [3–9, 16].

Расчет экономического ресурсного потенциала для солнечных тепловых коллекторов, ориентированных под углом наклона к горизонту, проводится по формуле

$$W_{\mathcal{E}T} = \sum_i W_{\mathcal{E}Ti} = \sum_i V_{Ti} \cdot S_{\mathcal{E}T} = 1262,2 \cdot S_{\mathcal{E}T} \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2 \cdot \text{год}. \quad (18)$$

где $W_{\mathcal{E}Ti} = 1, 2, \dots, 12$, суммирование проводится по всем месяцам года.

Объем выработки V_{Ti} тепловой энергии от солнечного излучения равен:

$$V_T = \sum_i V_{Ti} = \sum_i E_{Hi} \cdot F \left[(\tau\alpha) - U_L (T - T_{oi}) \frac{t_{Ci}}{E_{Hi}} \right] = \sum_i V_{Ti} = 1262,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2 \cdot \text{год}. \quad (19)$$

Удельный объем выработки солнечного излучения определяет область экономической целесообразности его использования и срок окупаемости установки.

Расчет экономического ресурсного потенциала получения электроэнергии от преобразования солнечного излучения аналогично определяется выражениями

$$W_{\mathcal{E}\Phi} = \sum_i W_{\mathcal{E}\Phi i} = \sum_i V_{\Phi i} \cdot S_{\mathcal{E}\Phi} = 239,4 \cdot S_{\mathcal{E}\Phi} \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}; \quad (20)$$

$$V_\Phi = \sum_i V_{\Phi i} = \sum_i E_{\Phi i} \eta_1 [1 - \chi (T_i - T_1)] = \sum_i V_{\Phi i} = 239,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2 \cdot \text{год}. \quad (21)$$

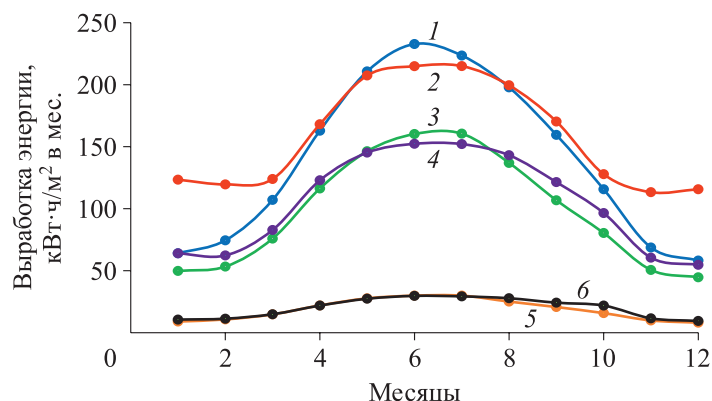
где $V_{\Phi i}$ — объем выработки энергии единицей площади солнечной батареи в i -й месяц, $\text{кВт} \cdot \text{ч/(м}^2 \cdot \text{мес.)}$; $E_{\Phi i}$ — среднееголетний приход солнечной энергии на единицу поверхности солнечной батареи в i -й месяц года, $\text{кВт} \cdot \text{ч/(м}^2 \cdot \text{мес.)}$; $S_{\mathcal{E}\Phi}$ — экономически целесообразная площадь установленных солнечных фотомодулей, м^2 [3, 17–19].

Распределение солнечных энергетических ресурсных потенциалов приведено на рис. 3.

Таким образом, экономический потенциал солнечного излучения в регионе имеет растущую зависимость от величины объема энергии, снимаемой с единицы поверхности приемника коллектора,

Рис. 3. Распределения солнечных энергетических ресурсных потенциалов в зал. Кара-Богаз-Гол по месяцам в течение года, кВт·ч/(м²·мес.).

Солнечные энергетические ресурсные потенциалы: валовый: 1 — при безоблачном небе; 2 — при средней облачности; выработка в тепловую энергию: 3 — техническая, 4 — экономическая; выработка в электрическую энергию: 5 — техническая, 6 — экономическая.



с учетом таких трех аспектов, как критическое значение удельного съема энергии, экономических параметров потребляемой промышленности и ценовых параметров промышленного производства энергии с учетом стоимости топлива и региональных экологических факторов.

Экологический потенциал солнечного излучения на прибрежной территории залива — это часть технического ресурсного потенциала, преобразованного в тепловую, электрическую и другие виды энергии с использованием технологического оборудования для снижения антропогенных нагрузок на окружающую среду от ископаемого, органического топлива [3–9, 23].

В примере, приведенном в таблице, экологический ресурсный потенциал солнечной энергии мы представляем как сумму экономических ресурсных потенциалов тепловой (57,82 кг у. т.) и электрической (10,93 кг у. т.) энергии, полученных путем преобразования солнечного излучения. Экономия органического топлива при преобразовании с 1 м² в тепловую энергию составляет 470,87 л, в электрическую — 89,04 л дизельного топлива в течение года на прибрежных территориях залива.

Для эффективного использования солнечно-энергетических технологических станций, установок по различным временам года необходимо определить оптимальный угол наклона солнечного преобразователя с учетом расположения географического места в течение года. Расчет оптимального угла наклона солнечного приемника с ориентацией восток-запад по месяцам года для побережья Кара-Богаз-Гол составляет: для зимы — 56° (0,55919 радиан); для лета — 26° (0,89879 радиан), оптимальный угол наклона — 41° (0,75471 радиан) в течение года [3–9, 10, 12].

Исходя из вышесказанного, была произведена ориентировочная калькуляция плавающей солнечной фотоэлектрической электростанции (СФЭС) в зал. Кара-Богаз-Гол. Плавающая СФЭС площадью 100 м² и мощностью одного фотомодуля 200 Вт ориентирована на юг с оптимальным углом наклона 41°. Электропроизводительность СФЭС составляет: в сутки — 98,87 кВт·ч; в год — 36 066 кВт·ч. Стоимость фотоэлектрической станции составляет, по примерным расчетам, 9910,1 долл. США, рентабельность СФЭС 20,45 %. Цена 1 кВт·ч 0,055 долл. США, срок окупаемости солнечной фотоэлектрической электростанции составит 5 лет. Предположительная прибыль за 20 лет составит 30 614,1 долл. США.

На основе научно-исследовательских, теоретических и практических расчетных данных получены следующие данные ресурсных потенциалов для побережья зал. Кара-Богаз-Гол: приход прямого потока солнечного излучения ($E_{пр}$) на горизонтальную поверхность равен 92,03 кВт·ч/(м²·мес.); приход рассеянного солнечного излучения ($E_{дл}$) на единицу горизонтальной поверхности равен 48,4 кВт·ч/(м²·мес.); часовой угол движения солнца (ω) меняется в пределах от –21,2 до 21,6°; угол солнечного склонения, $\delta = 0,36666$; угловой наклон солнечного приемника к горизонту поверхности, $\cos \beta = 0,75471$; удельные энергетические параметры ($E_{нл}$) солнечной установки равны 156,5 кВт·ч/(м²·мес.) [3, 10, 15, 24–25].

Валовый ресурсный потенциал солнечного излучения площадью (S) на 1 м² побережья территории залива Кара-Богаз-Гол составляет:

$$W_B = ES = 1685,4 \text{ кВт·ч/(м}^2 \cdot \text{год)}. \quad (22)$$

Значение общего ресурсного технического потенциала солнечного излучения (W_T) от преобразования в тепловую ($W_{ТТ}$) и электрическую энергии ($W_{ТФ}$) равно:

$$W_T = W_{ТТ} + W_{ТФ} = (1177,1k_T + 222,65 (1 - k_{\Phi}))qS, \text{ кВт·ч/год}. \quad (23)$$

Общий экономический ресурсный потенциал солнечной энергии (W_{Σ}) получается путем суммирования потенциалов тепловой ($W_{\Sigma T}$) и электрической ($W_{\Sigma \Phi}$) энергий:

$$W_{\Sigma} = W_{\Sigma T} + W_{\Sigma \Phi} = 1262,2 \cdot S_T + 239,4 \cdot S_{\Phi}, \quad (24)$$

где k_T и k_{Φ} — доли площади теплового коллектора и фотомодуля, соответственно равны 0,9 и 0,1; S_T — площадь теплового коллектора, м²; S_{Φ} — площадь фотомодуля коллектора, м².

Таким образом, гелиоэнергетические ресурсные потенциалы солнечного излучения с одного квадратного метра равны, кВт·ч/(м²·год): валовый потенциал — 1685,4, технический потенциал от преобразования в тепловую энергию — 1177,1; в электрическую — 222,6; экономический потенциал преобразования в тепловую энергию — 1262,2; в электрическую — 239,4. Сокращение органического топлива от преобразования, кг у. т.: в тепловую энергию — 57,82; в электрическую — 10,93, при этом экологический потенциал сокращения выбросов углекислого газа составит, кг/год: 752,9; 142,4. Информация о научно обоснованных и систематизированных ресурсных потенциалах солнечного излучения поможет при разработке, создании, внедрении и проектировании солнечно-энергетических технологических комплексов и эксплуатации энергоустановок на территории, окружающей зал. Кара-Богаз-Гол.

Ожидаемые результаты сокращения вредных выбросов в окружающую среду при использовании солнечных энергетических технологий в прибрежных районах зал. Кара-Богаз-Гол с 1 м² в течение года составляют:

— при годовой выработке тепловой энергии 1177,12 кВт·ч/(м²·год), экономия расхода топлива составит 470,8 л в год, сокращение выбросов: SO₂ — 9,8; NO_x — 5,26; CO — 0,68; CH₄ — 1,4; CO₂ — 752,94; твердых веществ — 1,02 кг/год.

— при годовой выработке электрической энергии 222,2 кВт·ч/(м²·год), экономия расхода топлива составит 89,1 л в год, сокращение выбросов: SO₂ — 1,8; NO_x — 0,99; CO — 0,12; CH₄ — 0,27; CO₂ — 142,4; твердых веществ — 0,19 кг/год [10, 18–20].

Результаты полученных уравнений регрессии (1–9) будут использоваться проектными организациями при разработке проектно-сметной документации и ТЭО, для проектирования и строительства солнечно-энергетических, технологических комплексов и установок на территории залива.

Согласно полученным результатам расчетов солнечного излучения для экономии топлива, возможно снижение себестоимости различных видов продукции и энергозатрат на ее получение, улучшится экологическая обстановка и социально-бытовые условия Каспийского региона Туркменистана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе научно обоснованной инновационной методики и систематизированных расчетов солнечно-энергетических ресурсов с учетом природно-климатических режимов и географического расположения зал. Кара-Богаз-Гол в Каспийском море была дана оценка возможности их использования для частичного перехода на энергообеспечение за счет солнечного энергетического потенциала территории залива.

Энергоэффективность использования солнечного излучения для территории залива Кара-Богаз-Гол в Каспийском море составляет, кВт·ч/(м²·год): валовый потенциал — 1685,4; технический потенциал преобразования солнечной энергии в тепловую энергию — 1177,1 в электрическую энергию — 222,65; экономический потенциал преобразования солнечной энергии, кг у. т.: в тепловую — 57,82; в электрическую энергию — 10,93. Экономия топлива в литрах составит при преобразовании соответственно: в тепловую энергию 470,87; в электрическую — 89,1, сокращение вредных выбросов в окружающую среду от преобразования в тепловую энергию составит, кг/год: SO₂ — 9,8; NO_x — 5,26; CO — 0,68; CH₄ — 1,4; CO₂ — 752,94; твердых веществ — 1,02, от преобразования в электрическую, кг/год: SO₂ — 1,85; NO_x — 0,99; CO — 0,13; CH₄ — 0,27; CO₂ — 142,4; твердых веществ — 0,2.

В результате исследования выявлено, что стоимость солнечной фотоэлектрической станции составляет 9910,1 долл. США, средняя нагрузка на «солнечный дом» при использовании необходимых электроприборов — 7,75 кВт·ч/сут, %. При цене 1 кВт·ч 0,055 долл. США на территории Туркменистана срок окупаемости солнечной фотоэлектрической электростанции составит 5 лет, рентабельность СФЭС 20,45 %, чистая прибыль за 20 лет достигнет 30 614,1 долл. США.

Аналогичные исследования в этой области солнечной энергетики провели ведущие ученые, такие как П.П. Безруких, Д.С. Стребков, У.А. Бекман, Д.А. Даффи, Дж. Твайдел и др. В их работах недо-

статочно широко рассмотрены основы научного обобщающего, систематизированного анализа энергетических и экологических потенциалов. В частности, для Туркменистана, обладающего значительными ресурсами солнечной энергии для использования энергоэффективных технологий и установок, не сформулированы рекомендации по реализации внедрения разработок, развитию и освоению энергетических потенциалов солнечной энергии с учетом инновационных методик. Не составлялись уравнения регрессии (1–9) для использования проектировщиками при составлении проектно-сметной документации и при расчетах ТЭО для внедрения солнечно-энергетических технологий в регионе Каспийского моря.

Внедрение солнечно-энергетических технологических установок позволит решить целый ряд задач по энергообеспечению и энергоснабжению химической, медицинской промышленности и сельского хозяйства, тем самым увеличить продуктивность отраслей для производства медикаментов, удобрений, продовольствия, повысить энергоэффективность, рациональное использование природных ресурсов, улучшить социально-бытовые условия жизни и труда, снизить антропогенные нагрузки на экосистему. Все это окажет содействие выполнению Национальной, Государственной энергетической и социально-экономической программ устойчивого развития Туркменистана, а также выполнению Парижского соглашения об изменении климата [26], решения 28-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP28) [27] и ряда других государственных и международных программ Туркменистана.

Работа выполнена как инициативная тема, без финансирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердымухамедов Г.М. Туркменистан на пути достижения Целей устойчивого развития. — Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2018. — 465 с.
2. Закон Туркменистана от 13 марта 2021 года № 337-VI «О возобновляемых источниках энергии» (в редакции Закона Туркменистана от 25.11.2023 г. № 75-VII) [Электронный ресурс]. — https://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=130998 (дата обращения 22.09.2023).
3. Пенджиев А.М. Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии. — М.: Русайнс, 2023. — 400 с.
4. Стребков Д.С., Пенджиев А.М., Мамедсахадов Б.Д. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане. — М.: Изд-во Всеросс. науч.-исслед. ин-та электрификации сельск. хоз-ва, 2012. — 498 с.
5. Penjiyev A.M. Wave Energy Resources of the Caspian Sea on the Coast of Turkmenistan // Applied Solar Energy. — 2022. — Vol. 58, N 2. — P. 306–310.
6. Leroy S.A.G., Marret F., Giralt S., Bulatov S.A. Natural and anthropogenic rapid changes in the Kara-Bogaz Gol over the last two centuries reconstructed from palynological analyses and a comparison to instrumental records // Quaternary International. — 2006. — Vol. 150, Iss. 1. — P. 52–70.
7. Булатов С.А. Новый вид Bacillariophyta из залива Кара-Богаз-Гол (Каспийское море, Туркменистан) // Альгология. — Т. 30, № 2. — С. 211–218.
8. Булатов С.А. Структура и состояние диатомовых сообществ высокоминерализованных вод залива Кара-Богаз-Гол // Морфология, экология и биогеография диатомовых водорослей: Материалы докл. VIII Школы диатомологов России и стран СНГ (Борок, 16–19 сент. 2002 г.) [Электронный ресурс]. — https://www.researchgate.net/publication/337424214_STRUCTURE_AND_CONDITION_OF_DIATOMIC (дата обращения 22.09.2023).
9. Костяной А.Г., Лебедев С.А., Зонн И.С., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М. Спутниковый мониторинг Туркменистана. — М.: Сигнал, 2011. — 16 с.
10. Кара-Богаз-Гол вчера, сегодня, завтра / Отв. ред. А.Г. Аганбегян, О.Г. Овезгелдиев. — Ашхабад: Ылым, 1988. — 340 с.
11. Лебедев С.А. Модель средней высоты морской поверхности Каспийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — № 3. — С. 224–234.
12. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3, ч. 1–16. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — 502 с.
13. Булатов С.А. Кара-Богаз-Гол: как все были уверены, что именно это озеро убивает Каспийское море [Электронный ресурс]. — <https://enciclopediya-geografa.ru/puteshestviya/6016-kara-bogaz-gol-kak-vse-byli-uvereny-chto-imenno-eto-ozero-ubivaet-kaspiyskoe-more.html> (дата обращения 22.09.2023).
14. Пенджиев А.М. Изменение климата и возможности уменьшения антропогенных нагрузок. — Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. — 164 с.
15. Пенджиев А.М. Теоретические и методические расчеты потенциалов солнечно-энергетических ресурсов на Юго-Восточных Каракумах // Альтернативная энергетика и экология. — 2014. — № 8. — С. 34–51.

16. Пенджиев А.М. Экономическая экспертиза эффективности инновационной технологии // Научный результат: Экономические исследования. — 2017. — № 4. — С. 3–14.
17. Пенджиев А.М. Основы ГИС в развитии возобновляемой энергетики. — Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. — 308 с.
18. Стребков Д.С. Основы солнечной энергетики. — М.: САМ Полиграфист, 2019. — 326 с.
19. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузницова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика. — М.: Издат. дом Моск. энергетич. ин-та, 2008. — 276 с.
20. Безруких П.П., Арбузов Ю.Д., Борисов Г.А., Виссарионов В.И., Евдокимов В.М., Малинин Н.К., Огородов Н.В., Пузаков В.Н., Сидоренко Г.И., Шпак А.А. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. — СПб.: Наука, 2002. — 314 с.
21. Васильев Ю.С., Безруких П.П., Елистратов В.В., Сидоренко Г.И. Оценки ресурсов возобновляемых источников энергии в России: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. технич. ун-та, 2008. — 250 с.
22. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фотоэлектричества. — М.: Изд-во Всеросс. науч.-исслед. ин-та электрификации сельск. хоз-ва, 2012. — 292 с.
23. Васильев Ю.С., Хрисанов Н.И. Экология использования возобновляющих энергоисточников. — Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1991. — 247 с.
24. Strebkov D.S., Penjiyev A.M. Solar power plants with parabolic trough concentrators in the Desert Area of Karakum // Applied Solar Energy. — 2019. — Vol. 55, N 3. — P. 195–206.
25. Penjiyev A.M. Thermal Regime in Combined Cultivation Constructions // Applied Solar Energy. — 2018. — Vol. 54, N 3. — P. 168–204.
26. Парижское соглашение [Электронный ресурс]. — https://unfccc.int/files/-meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian.pdf (дата обращения 22.09.2023).
27. Выступление Президента Туркменистана на 28-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP28) [Электронный ресурс]. — <https://un.mission.gov.tm/ru/news/126008> (дата обращения 22.09.2023).

Поступила в редакцию 18.06.2024

После доработки 09.10.2024

Принято к публикации 10.03.2025