

Научная статья
УДК 581.9+620.9
EDN XKZNOE

Экоэнергетический потенциал солнечно-ветровой станции в Хазарском заповеднике в Каспийском море

А. М. Пенджиев *, Б. М. Мамедов

*Туркменский государственный архитектурно-строительный институт,
Ашгабат, Туркменистан*

** e-mail: ampenjiyev@gmail.com*

Аннотация

Рассмотрены солнечно-ветровые энергоресурсы и их экологический потенциал в Хазарском заповеднике на острове Огурчинском в Каспийском море. Методологической основой послужили эмпирические расчеты для составления технико-экономического обоснования и создания, разработки и внедрения энергоэффективных технологий на основе солнечно-ветрового энергооборудования в заповеднике. На основе теоретических и методических расчетов и с учетом природно-климатических условий дана энергетическая, экономическая и экологическая оценка солнечной энергетической станции мощностью 10 кВт·ч/сут. Станция вырабатывает электроэнергию – 3658.34 кВт·ч/год, экономит органическое топливо – 1463.336 кг у. т. и сокращает вредные выбросы в биосферу: SO₂ – 30.41 кг, NO_x – 16.38 кг, CO – 2.13 кг, CH₄ – 4.47 кг, CO₂ – 2339.64 кг, твердых веществ – 3.19 кг. С помощью одной ветроустановки мощностью 400 Вт можно получить 19.45 кВт·ч/м²·год электроэнергии (в среднем 1.62 кВт·ч/м²·мес.), при этом эквивалент сокращения расхода топлива составит 7.78 кг у. т. Полученные научно обоснованные результаты можно использовать для улучшения социально-бытовых, экономических и экологических условий обитателей острова, сохранения биоресурсов и укрепления энергетической и экологической безопасности. Результаты технико-экономического обоснования помогут внедрению различных солнечно-ветровых технологических комплексов в регионе.

Ключевые слова: солнечно-ветровые энергоресурсы, экологический потенциал, математическая статистика, Хазарский заповедник, остров Огурчинский, Каспийское море

Для цитирования: Пенджиев А. М., Мамедов Б. М. Экоэнергетический потенциал солнечно-ветровой станции в Хазарском заповеднике в Каспийском море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 96–114. EDN XKZNOE.

© Пенджиев А. М., Мамедов Б. М., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Ecoenergy Potential of a Solar-Wind Station in the Khazar Nature Reserve in the Caspian Sea

A. M. Penjiyev *, B. M. Mamedov

Turkmen State Institute of Architecture and Civil Engineering, Ashgabat, Turkmenistan

** e-mail: ampenjiyev@gmail.com*

Abstract

The article considers solar and wind energy resources and their ecological potential in the Khazar Reserve on Ogurchinsky Island in the Caspian Sea. The methodological basis is formed by the empirical calculations for the preparation of a feasibility study and the creation, development and implementation of energy-efficient technologies based on solar-wind energy equipment in the Reserve. The paper provides an energy, economic and ecological assessment of a solar power station with a capacity of 10 kW h/day based on theoretical and methodological calculations and taking into account natural and climatic conditions. The station generates electricity (3658.34 kW·h/year), saves organic fuel (1463.336 kg of equivalent fuel) and reduces harmful emissions into the biosphere: SO₂ (30.41 kg), NO_x (16.38 kg), CO (2.13 kg), CH₄ (4.47 kg), CO₂ (2339.64 kg), solids (3.19 kg). One 400 W wind turbine can generate 19.45 kW·h/m²·year, or an average of 1.62 kW·h/m²·month, with an equivalent reduction in fuel consumption of 7.78 equivalent fuel. The obtained scientifically substantiated results will contribute to the improvement of social, living, economic and environmental conditions of the island's inhabitants, the conservation of bioresources, and strengthening energy and environmental security. The results of the feasibility study will help implement various solar-wind technological complexes in the region.

Key words: solar-wind energy resources, environmental potentials, mathematical statistics, Khazar Reserve, Ogurchinsky Island, Caspian Sea

For citation: Penjiyev, A.M. and Mamedov, B.M., 2025. Ecoenergy Potential of a Solar-Wind Station in the Khazar Nature Reserve in the Caspian Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 96–114.

Введение

Решение задачи энергообеспечения заповедных зон и пастбищных хозяйств пустыни Каракумы, удаленных от централизованных энергосетей, требует изучения энергopotенциала возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Оно также обусловлено глобальными проблемами изменения климата и необходимостью улучшения социально-бытовых, экономических и экологических условий в труднодоступных регионах Туркменистана. Переход на ВИЭ в будущем позволит сократить потребление ископаемых видов топлива, что обеспечит экологическую безопасность экосистемы и сохранит биоресурсы [1].

Туркменистан предпринимает все шаги в решении этой важной задачи и внедряет всесторонние механизмы в сотрудничестве с международными организациями для создания экологической и техногенной безопасности. Об этом сказал Президент Туркменистана в своих выступлениях на 78-й сессии Генеральной Ассамблеи ООН и 28-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата.

На территории страны насчитывается восемь государственных природных заповедников – Репетекский, Бадхызский, Копетдагский, Сюнт-Хасардагский, Капланкырский, Амударьинский, Койтендагский и Хазарский – и 14 заказников общей площадью 2.0 млн га, или 4 % территории.

Хазарский заповедник занимает площадь в 270 тыс. га, основная его часть расположена на территории Каспийского моря. На этой территории произрастает более 600 видов растений и обитает 466 видов птиц и 55 видов морских рыб, пять из которых занесены в Красную книгу. Сюда на зимовку прилетают более 5 млн птиц. Фауна региона включает редкие и охраняемые виды, такие как каспийский тюлень, ушастый еж и джейран. Здесь также обитают заяц-толай, камышовый и барханный коты, лисицы и другие представители пустынной экосистемы [1–4].

В состав Хазарского заповедника входит о-в Огурчинский (рис. 1), который находится в юго-восточной части Каспийского моря на территории Туркменистана ($39^{\circ} 6' \text{ с. ш.}; 53^{\circ} 6' \text{ в. д.}$). Это самый крупный в Каспийском море песчаный остров, который расположен на расстоянии 45 км от берега и тянется узкой косой шириной 1–1.5 км и длиной около 42 км с севера на юг. Подачу электроэнергии на остров обеспечивают дизельные генераторы, органическое топливо (дизельное топливо, бензин, керосин, сжиженный газ) ввозится морским транспортом, что приводит к значительным финансовым расходам¹⁾ [5–7]. Использование дизельного топлива приводит к выбросу в окружающую среду определенного количества загрязняющих веществ.

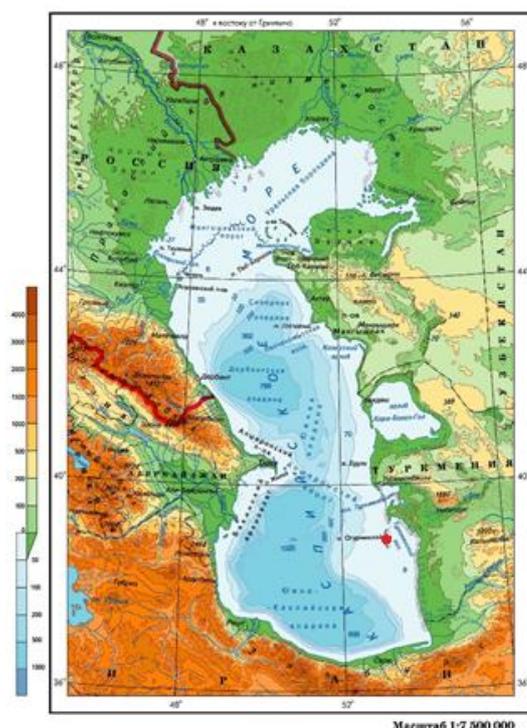


Рис. 1. Месторасположение о-ва Огурчинского (красная точка) Хазарского заповедника в Каспийском море [6, 7]

Fig. 1. Location of Ogurchinsky Island (red dot) of the Khazar Nature Reserve in the Caspian Sea [6, 7]

¹⁾ Научно-прикладной справочник по климату СССР. Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. 502 с.

Системные меры по энергообеспечению острова и укреплению экономической, продовольственной, водной и экологической безопасности можно реализовать с использованием возобновляемых энергоресурсов, в данном случае на основе солнечно-ветровых энергетических установок в сочетании с современными «зелеными» технологиями. При этом в регионе будут сохраняться биоресурсы и поддерживаться биоразнообразие. В настоящее время энергоснабжение заповедных территорий осуществляется на минимальном уровне: электричество вырабатывается с помощью маломощных бензоэлектрических генераторов, а отопление организовано на основе сжиженного газа.

Одним из основных недостатков работы бензоэлектрических агрегатов в заповедной зоне является сильный шум генератора, звук которого слышен на расстоянии 5–10 км, что вызывает беспокойство у обитателей заповедной зоны. Кроме этого, при использовании топлива в окружающую среду поступают загрязняющие вещества.

Техническими недостатками бензиновых и дизельных генераторов являются низкий моторесурс (600–1500 ч) и высокий расход органического топлива (от 350 до 500 г/кВт·ч), эти генераторы не выдерживают больших осветительных нагрузок и не подлежат круглосуточному использованию для питания бытовых, лабораторных и других электроприборов [2, 3, 8]. С учетом этого одним из основных требований к современным автономным энергоисточникам является круглосуточное энергообеспечение потребителей. В настоящее время состояние действующих энергетических станций (на бензиновых и дизельных генераторах) оценивается как неудовлетворительное из-за крайней изношенности материальной части.

Эти недостатки можно устранить путем внедрения солнечно-ветровых электростанций с учетом местного энергоресурсного потенциала, что одновременно смягчит негативное воздействие дизельных и бензиновых электростанций на окружающую среду. Все сказанное выше делает решение этой задачи несомненно *актуальным*.

Приоритетным и энергетически эффективным вариантом является использование солнечно-ветрового потенциала Хазарского заповедника на о-ве Огурчинском (*Ogurjaly*) в Каспийском море. Но для внедрения солнечно-ветровых энергетических инженерных технологий в производство необходима разработка проектно-сметной документации и технико-экономического обоснования (ТЭО) их применения [1–3].

Степень разработанности темы. Большой вклад в развитие солнечно-ветровой энергетики внесли известные ученые, такие как В. А. Баум, П. П. Безруких, В. И. Виссарионов²⁾, В. М. Евдокимов, Д. С. Стребков, Р. Б. Байрамов, В. П. Харитонов, У. А. Бекман, Д. А. Даффи, Дж. Твайдел, А. Ангстром, М. Джин, Х. Л. Уигли и многие другие³⁾ [3, 9–15].

²⁾ Солнечная энергетика / Под ред. В. И. Виссарионова. Москва : Издательский дом МЭИ, 2008. 276 с. EDN QMKGVT.

³⁾ Оценки ресурсов возобновляемых источников энергии в России / Ю. С. Васильев [и др.]. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 250 с.

Туркменские ученые также проделали значительную работу в области использования солнечной энергии и достигли весьма высоких научно-практических результатов. Основным недостатком этих научных исследований заключается в том, что они не учитывают воздействие природно-климатических факторов и не проводят системных расчетов солнечно-ветровых энергетических ресурсов и их технического, экономического и экологического потенциалов.

Анализ литературных источников показывает, что регионы Каспийского моря и острова Туркменистана обладают значительными возобновляемыми энергетическими ресурсами, но в доступных научных исследованиях отсутствует оценка энергетической эффективности, не рассматривается экономическая целесообразность и игнорируются экологические приоритеты^{2),3)} [3–5, 9–15].

На основании приведенных выше аналитических исследований использования солнечно-ветровых энергетических технологий определены цели и задачи исследования энергетического ресурсного потенциала солнечно-ветровой энергии Хазарского заповедника.

Цель исследования – системно обосновать солнечно-ветровой энергопотенциал с использованием инновационной методики расчетов, оценить энергетический, экономический и экологический потенциалы для разработки и внедрения технологий возобновляемой энергетики в исследуемом регионе.

Задача исследования – обобщить и оценить технико-экономический, экологический ресурсный потенциалы солнечной и ветровой энергоустановок по параметрам энергоэффективности, экономии топлива, влияния на экологию о-ва Огурчинского Хазарского заповедника; провести по инновационной методике системные расчеты энергопроизводительности преобразования солнечной радиации в электрическую и тепловую энергию и определить основной ветроэнергетический потенциал; составить уравнения регрессии для прогнозирования энергоресурсов при подготовке ТЭО.

Предметом исследования является энергоэффективность и экологичность солнечно-ветровых установок для о-ва Огурчинского.

Научная новизна исследования заключается в использовании новой системной методики расчета энергоэффективности с учетом природно-климатических условий и применения солнечно-ветровых энергетических технологий, а также в оценке экономического и экологического ресурсного потенциала Хазарского заповедника для внедрения этих технологий на о-ве Огурчинском и составления ТЭО.

Методология и методы исследования

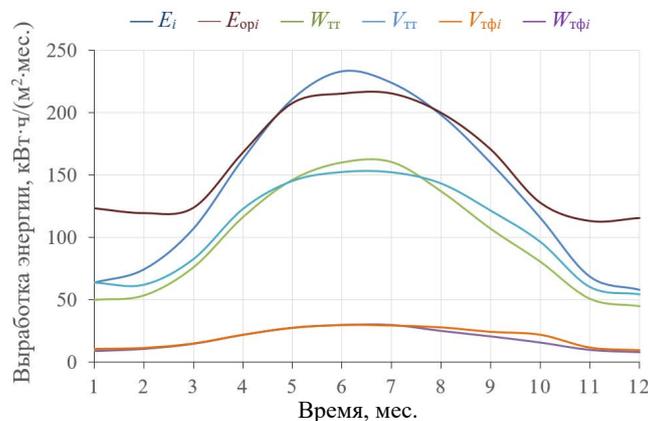
Методология и методы исследования основываются на системном подходе и теоретических и практических расчетных данных об использовании солнечно-ветровых энергетических технологий для сохранения богатого биологического разнообразия и биоресурсов острова. Методологическую основу составили эмпирические расчеты для составления ТЭО и создания, разработки и внедрения энергоэффективных энергетических технологий на основе солнечно-ветрового энергооборудования в хозяйствах в исследуемом регионе^{2),3)} [3–5, 14].

Метеорологические особенности острова

Энергоресурсы прямой солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность при ясном небе в Туркменистане в течение года, варьируют от 1699.4 до 1793.0 кВт·ч/(м²·год) (146–154 ккал/см²), рассеянной солнечной радиации при чистом небе – от 372.3 до 453.0 кВт·ч/(м²·год) (32–39 ккал/см²). В пасмурные и облачные дни активность прямой солнечной радиации снижается от 35 до 27 %, увеличивая рассеянную составляющую до 25–40 %. На всей территории Туркменистана суммарная солнечная энергия изменяется в пределах от 1687.7 до 1897.2 кВт·ч/(м²·год) (145–163 ккал/см²). Ежемесячное распределение энергетического валового, технического, экономического потенциала солнечной энергии в расчете на квадратный метр поверхности ¹⁾ приведено на рис. 2 [3–7].

Как видно из рис. 2, солнечный энергетический ресурсный потенциал острова меняется от 44 до 50 кВт·ч/(м²·мес.), суммарная солнечная радиация на горизонтальной поверхности составляет 1685.4 кВт·ч/(м²·год), среднемесячная радиация равна 140.45 кВт·ч/(м²·мес). Продолжительность солнечного сияния на острове составляет 2668 ч/год, среднее месячное сияние – 222.3 ч/мес. В июле солнце восходит в 4:44 и заходит в 19:16, а в январе восходит в 7:05 и заходит в 16:55 ¹⁾ [3, 4, 8].

Температурный режим воздуха на острове зависит от сезона. Средняя температура колеблется от 4.0 до 27.9 °С, в мае она составляет 20.0 °С и удерживается на этом уровне до октября, постепенно снижаясь до 17.5 °С, в январе



Р и с . 2 . Ежемесячное распределение солнечного энергетического ресурсного потенциала: валового $E_{опi}$ и технического E_i , преобразованных в тепловую $W_{тi}$ и электрическую энергию $W_{тфi}$, преобразование удельной в тепловую $V_{тi}$ и электрическую $V_{тфi}$ энергию на территории острова в течение года

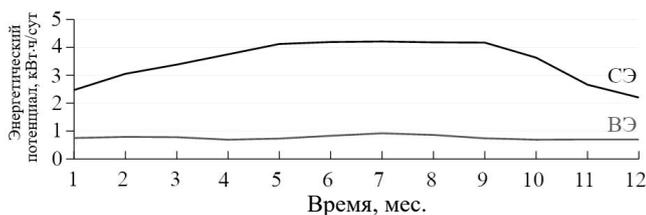
F i g . 2 . Distribution of solar energy resource potentials: gross $E_{опi}$ and technical E_i , converted into thermal $W_{тi}$ and electrical energy $W_{тфi}$ specific production into thermal $V_{тi}$ and electrical $V_{тфi}$ energy on the territory of the island by month during the year

достигает своего минимума – 4.0 °С. По климатическим данным, максимальная средняя температура воздуха в январе равна 11.0 °С, в июле она поднимается до 31.1 °С. Минимальная температура опускается в январе до –0.4 °С, в июле повышается до 23 °С, среднегодовая температура на острове составляет 11.0 °С¹⁾ [3–7].

Ветроресурсы. Благодаря большой меридиональной протяженности Каспийского моря и разнообразию типов атмосферных явлений и циркуляции, на острове наблюдается сложный ветровой режим и неоднородное распределение температуры воды. Эти параметры обусловлены различиями природно-климатических условий, синоптическими ситуациями, атмосферными явлениями, температурой воздуха и направлением течений, что приводит к колебаниям скорости ветра¹⁾ [3–5, 8, 9].

Научные исследования показали, что формирование штормовых ветров зависит от характера рельефа местности и атмосферной циркуляции. Средняя скорость ветра на острове меняется в пределах от 2.4 до 4.6 м/с, средняя скорость за год равна 3.3 м/с. На острове наблюдались сильные штормовые ветры скоростью 25 м/с и более. Роза ветров¹⁾ в заливе меняется в зависимости от циркуляции атмосферного воздуха по сезонам года [3, 4, 16, 17].

На рис. 3 приведено среднесуточное распределение ветрового и солнечного энергопотенциалов по месяцам года для о-ва Огурчинского.



Р и с . 3 . Среднесуточное распределение ветрового (ВЭ) и солнечного (СЭ) энергопотенциалов на о-ве Огурчинском по месяцам

F i g . 3 . Average daily distribution of wind (ВЭ) and solar (СЭ) energy potentials on Ogurchinsky Island by month of the year

Направления ветров в Хазарском заповеднике демонстрируют зависимость от атмосферной циркуляции, температуры воды и распределяются в пределах от 3 % южного до 26 % западного с преобладанием западного (26 %), северо-западного (16 %), северо-восточного (15 %) и юго-западного (14 %) ветров¹⁾.

Методика исследования экоэнергетических ресурсов

В основу расчета солнечного ресурсного энергопотенциала были положены методики²⁾ авторов работ [3–5, 12–16] с учетом условий Каспийского региона. Как уже отмечалось, 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 [8–11].

При определении солнечно-энергетического потенциала на острове учтены многолетние метеорологические данные (продолжительность солнечного сияния; углы падения на наклонную и нормально ориентированную поверхности; часовой угол Солнца; параметры движения Солнца (склонения на наклонную поверхность и к горизонту, восхода и захода); характеристики рассеянной радиации, альbedo; среднемесячная и годовая температура наружного воздуха

и поверхности работающей солнечной энергоустановки), а также удельные энергетические параметры солнечной энергоустановки, локальные климатические факторы.

При расчетах физических и математических моделей приняты некоторые допущения: территория острова рассматривается как участок с интенсивно поступающей на поверхность солнечной радиацией, географические и природно-климатические условия однородны на всей площади о-ва Огурчинского, использованы среднееголетние метеорологические данные для всего острова [3–5, 9].

Оптимальный угол наклона солнечных преобразователей на острове. Для эффективного использования солнечно-энергетических технологических станций и установок в течение года необходимо определить оптимальный угол наклона солнечного преобразователя с учетом географических особенностей места его установки. Рассчитаны следующие оптимальные углы наклона солнечного приемника с ориентацией восток – запад: зимой 54° (-0.82930 рад), летом 24° (0.42418 рад), среднегодовое значение 39° (0.26664 рад). Результаты энергопроизводительности фотомодулей в зависимости от угла наклона для о-ва Огурчинского приведены на рис. 4 [2–4, 7, 19].

Валовый солнечно-энергетический потенциал – среднееголетнее значение суммарной солнечной радиации, поступающей на о-в Огурчинский в течение года, которая рассматривается как энергетический ресурс.

Для расчета ресурсного валового потенциала учтены все приведенные выше метеорологические факторы солнечной радиации, поступающей на горизонтальную и оптимально наклонную поверхности в течение многолетнего периода. Данные систематизированы по месяцам года (E_i , где $i = 1, 2, \dots, 12$)¹⁾ [3–5, 10, 17–20].

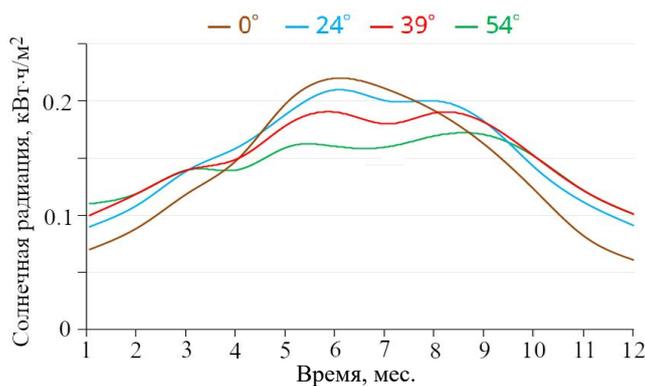


Рис. 4. Поступление солнечной радиации в зависимости от угла наклона фотомодуля, равного 0° ; 24° ; 54° ; 39° (оптимальный угол для о-ва Огурчинского)

Fig. 4. Receipt of solar radiation at different angles of inclination of the photomodule, the angles equaling 0° ; 24° ; 54° ; 39° (the optimal angle for Ogurchinsky Island)

Расчеты выполняли с учетом среднего значения косинуса угла θ наклона прямой солнечной радиации к нормали в течение 10-часового интервала – с 7:00 до 17:00 – для фотомодуля площадью 0.24 м². Среднегодовое значение солнечной радиации E_{opi} при безоблачном небе на единицу горизонтальной поверхности по месяцам года с учетом площади рассчитано по формуле

$$E_{opi} = \frac{E_{\Pi i}}{\langle \cos \theta \rangle} = \frac{(1 - \varepsilon)E_i}{\langle \cos \theta \rangle} = 456.2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{мес.}),$$

где $E_{\Pi i}$ – среднегодовое значение прямого потока солнечной радиации на единицу горизонтальной поверхности по месяцам года, кВт·ч/(м²·мес.); E_i – среднегодовое значение солнечной энергии на единицу горизонтальной поверхности по месяцам в течение года, кВт·ч/(м²·мес.); $\cos \theta$ – среднее значение угла падения солнечных лучей на нормально ориентированную поверхность, который меняется от 24° летом до 54° зимой; ε – коэффициент излучения, варьирующийся от 0.14 до 0.28 (среднегодовое значение 0.221667)^{1), 2)} [3–5, 10, 14, 15]. Оптимальный угол наклона для острова за год – 39°.

Суммарная солнечная радиация E за 10-часовой интервал в сутки, от 07:00 до 17:00, на единицу горизонтальной поверхности фотомодуля в год равна

$$E = \sum_i E_i = 404.5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год}).$$

В итоге валовый потенциал солнечной радиации W_B на 0.24 м² площади острова составляет

$$W_B = E \cdot S_{сэс} = 404.5 \cdot 0.24 = 97.08 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{год},$$

где $S_{сэс}$ – площадь солнечной электростанции, м².

Технический потенциал суммарной многолетней солнечной радиации определяется как количество энергии, которое может быть преобразовано в энергию с учетом экологических норм в течение года. В нашем случае он рассчитывается как сумма тепловой энергии, получаемой при преобразовании солнечной радиации для нагрева воды солнечным коллектором^{1), 2)} площадью 1.58 м², и электроэнергии, вырабатываемой фотомодулем площадью 0.24 м² [3–5, 10, 14, 15].

Технический потенциал преобразования солнечной энергии для нагрева воды водонагревателем. Используются параметры вакуумного солнечного коллектора марки SCH-12, который теплоизолирован полиуретановой пеной и состоит из 12 вакуумных трубок с медными тепловыми трубками диаметром 14 мм. Площадь теплового коллектора равна 1.58 м², вес 41 кг, габаритные размеры 2000 × 950 × 1420 × 1400 мм. Коллектор можно использовать круглогодично, он выдерживает температуру до –40 °С.

В расчетах также использовали такие теплотехнические параметры, как температура воды T (60 °С); интенсивность поглощения $F(\tau\alpha)$ (0.9); коэффициент теплоотдачи $FU_L = 0.005 \text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{°С})$; среднемесячная температура T_{oi} , °С; широта местности φ ; угол склонения δ ; продолжительность солнечного сияния, изменяющегося в течение i -го месяца t_{Ci} , ч/мес.; число ясных и полупасмурных часов и продолжительность рабочего времени t_{Pi} , ч/мес.^{2), 3)} [3, 4, 12–15].

Технический ресурсный потенциал теплового коллектора W_{Ti} , приходящийся на единицу отводимой площади S_T в течение рабочего периода времени с 7:00 до 17:00, равен

$$\frac{W_{\text{тгi}}}{S_{\text{т}}} = E_i F[(\tau\alpha) - U_L(T - T_{oi}) \cos(-\delta) \frac{t_{Pi}}{E_i}] = \sum_i W_{\text{тгi}} = 102.65 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год}),$$

где $S_{\text{т}}$ – площадь, отводимая под тепловой коллектор, м^2 ; $F(\tau\alpha)$ – интенсивность поглощения, $F(\tau\alpha) = 0.9$; FU_L – коэффициент теплоотдачи, 0.005; T_{oi} – средне-месячная температура, $^{\circ}\text{C}$; δ – угол склонения, градус; t_{Pi} – продолжительность работы солнечного коллектора, ч/мес.

Суммирование по всем месяцам определяет потенциал солнечной тепловой энергии $W_{\text{тг}}$ за 10-часовой интервал в сутки:

$$W_{\text{тг}} = 102.65 \cdot S_{\text{т}},$$

где $S_{\text{т}}$ – площадь, отводимая под солнечные тепловые установки, м^2 .

Технический потенциал электроэнергии, полученной от преобразования солнечной радиации. При расчетах использованы технические характеристики кремневого монокристаллического фотомодуля марки SIM-30-12-5BB: площадь 0.24 м^2 ; длина 541 мм; ширина 439 мм; высота 25 мм; мощность – 30 Вт; размер – 156×55.72 мм; рабочий вольтаж – 18.67 В; рабочий диапазон температур от -40 до 85 $^{\circ}\text{C}$.

В расчетных формулах учтены и приняты следующие параметры фотомодуля: градиенты температуры $\chi = 0.004 \text{ К}^{-1}$; температура $T_1 = 298 \text{ К}$; КПД $\eta_1 = 0.15$; коэффициенты теплоотдачи $\lambda = 40 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$; коэффициент поглощения $\alpha = 0.97$ ³⁾ [3–5, 14, 15].

Расчетное значение среднемесячной рабочей температуры T_i фотомодуля равно

$$T_i = \frac{\frac{E_i}{t_{Pi}}[\alpha - \eta_1(1 + \chi T_1)] + \langle \lambda \rangle T_{oi}}{\langle \lambda \rangle - \frac{E_i}{t_{Pi}} \eta_1 \chi},$$

где χ – градиенты температуры, 0.004 К^{-1} ; $T_{1,i}$ – температура, 298 К; η_1 – КПД, 0.15; λ – коэффициенты теплоотдачи, $40 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$; α – коэффициент поглощения, 0.97.

Значения технических потенциалов $W_{\text{тфи}}$ для каждого месяца при оптимальном угле наклона солнечного фотопреобразователя (39°) рассчитываются исходя из площади одного фотомодуля $S_{\text{ф}}$, равной 0.24 м^2 , по формуле

$$\frac{W_{\text{тфи}}}{S_{\text{ф}}} = E_i \eta_1 [1 - \chi(T_i - T_1)] = \sum_i W_{\text{тфи}} = 42.7 \cdot S_{\text{ф}},$$

где $S_{\text{ф}}$ – площади одного фотомодуля, м^2 ; T_i – среднемесячная рабочая температура фотомодуля, К.

Суммарный технический потенциал за год $W_{\text{тф}}$, кВт·ч/год, определяется суммированием значений по всей площади фотомодуля:

$$W_{\text{тф}} = 42.7 \cdot S_{\text{ф}}.$$

Экономический потенциал солнечной энергии характеризует возможный объем преобразования солнечной радиации в тепловую и электрическую энергию на о-ве Огурчинском в течение года с учетом экономической целесообразности. Представленные результаты экономически оправданы для данной территории при существующем уровне цен на энергоносители, получаемые

от преобразования традиционных источников энергии, и выражены в тоннах условного топлива (т у. т.) с учетом экологических норм.

При расчете экономического потенциала солнечной энергии для нагрева воды за основу взяты температура горячей воды $T_{\Gamma} = 60$ °С и температура холодной воды $T_{\chi} = 15$ °С; технические характеристики и параметры солнечных коллекторов: $F(\tau\alpha) = 0.9$; $F \cdot U_L = 0.005$ кВт/(м²·°С); норма расхода воды $m = 100$ кг/(чел.·сут); цена коллектора $C = 400$ долл. США/м²; $T_{\text{сл}} = 15$ лет; теплоемкость воды $c_p = 4.17$ кДж/(кг·°С) [3–5, 18–20].

Экономический ресурсный потенциал солнечных тепловых коллекторов, установленных под углом к горизонту, рассчитывается по формуле

$$W_{\text{ЭТ}i} = V_{\text{Т}i} \cdot S_{\text{ЭТ}},$$

где $W_{\text{ЭТ}i}$ – месячное значение экономического потенциала ($i = 1, 2, \dots, 12$) (суммирование проводится по всем месяцам года); $S_{\text{ЭТ}}$ – экономически целесообразная площадь установленных тепловых коллекторов.

Объем выработки $V_{\text{Т}i}$ тепловой энергии от солнечной радиации вычисляется по формуле

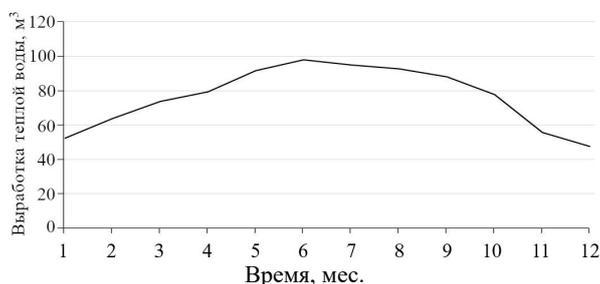
$$V_{\text{Т}i} = E_{\text{Н}i} \cdot F[(\tau\alpha) - U_L(T - T_{\text{oi}})] \frac{t_{\text{С}i}}{E_{\text{Н}i}} = \sum_i V_{\text{Т}i} = 8.5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{мес.}),$$

где $E_{\text{Н}i}$ – солнечная радиация по месяцам, кВт·ч/(м²·год).

Удельный объем выработки солнечной энергии определяет экономическую целесообразность ее использования и срок окупаемости установки.

Результаты расчета объемной теплопроизводительности водонагревателя, обеспечивающего нагрев воды до температуры до 44 °С (м³/мес.), приведены на рис. 5.

Таким образом, экономический потенциал солнечной радиации в регионе повышается в зависимости от величины объема вырабатываемой энергии, снимаемой с единицы поверхности приемника теплового водонагревателя, с учетом трех таких факторов, как критическое значение удельного съема тепловой энергии, экономических параметров потребляемой энергии и ценовых параметров промышленного производства энергии с учетом стоимости топлива и региональных экологических факторов.



Р и с . 5 . Объемная теплопроизводительность солнечного водонагревателя при нагреве 1 м³ воды до температуры 44 °С

F i g . 5 . Volumetric heating output of a solar water heater when heating 1 м³ water to a temperature of 44 °С by months

Расчет экономического ресурсного потенциала получения электроэнергии от преобразования солнечной радиации аналогично определяется выражением

$$W_{\text{ЭФ}i} = V_{\text{Ф}i} \cdot S_{\text{ЭФ}},$$

$$V = E_{\text{Ф}i} \eta_1 [1 - \chi(T_i - T_1)] = \sum_i V = 3.6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{мес.}),$$

где $V_{\text{Ф}i}$ – объем выработки энергии единицей площади солнечной батареи в i -й месяц, кВт·ч/(м²·мес.); $S_{\text{ЭФ}}$ – экономически целесообразная площадь установленных солнечных фотомодулей, м²; $E_{\text{Ф}i}$ – среднегодовой приход солнечной энергии на единицу поверхности солнечной батареи в i -й месяц года, кВт·ч/(м²·мес.)^{2), 3)} [3, 13–15].

Ожидаемые экономические показатели СЭС: электропроизводительность одной СЭС площадью 5.2 м² при мощности одного фотомодуля 100 Вт и ориентации на юг с оптимальным углом наклона 39° составляет 5.01 кВт·ч/сут или 60.4 кВт·ч/год; суммарная выработка электроэнергии 1829.17 кВт·ч/год. Стоимость солнечной электростанции составляет, по предварительным расчетам, 6336.96 долл. США; рентабельность – 6.76 %. При стоимости 1 кВт·ч 0.055 долл. США срок окупаемости фотоэлектрической СЭС составит 2.8 года.

Экологический потенциал солнечной радиации на территории острова – 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 [3–5, 17].

Энергетический, экономический и экологический потенциалы одного фотомодуля на острове составляют 42.77 кВт·ч/год или в среднем 3.6 кВт·ч/мес. электроэнергии, при этом экономический эквивалент сокращения расхода топлива равен 17.1 кг у. т. Экологический потенциал сокращения вредных выбросов: SO₂ – 0.3555 кг/год; NO_x – 0.1915 кг/год; CO – 0.0248 кг/год; CH₄ – 0.0522 кг/год; CO₂ – 27.35 кг/год; твердых веществ – 0.0373 кг/год.

Аналогично используется солнечная радиация для преобразования энергии с целью нагрева воды до 44 °С. Энергетический, экономический и экологический потенциалы составят 102.65 кВт·ч/год, или в среднем экономия 8.5 кВт·ч/мес. электроэнергии, при этом эквивалент сокращения расхода топлива – 41.1 кг у. т., экологический потенциал сокращения вредных выбросов: SO₂ – 0.853427 кг/год, NO_x – 0.459538 кг/год, CO – 0.05968 кг/год, CH₄ – 0.125328 кг/год; CO₂ – 65.64826 кг/год, твердых веществ – 0.08952 кг/год.

Ветровой энергопотенциал

Ветрогенерирующая установка марки *HU-400L* малой мощности предназначена для энергоснабжения. Технические характеристики: номинальная мощность 400 Вт; максимальная мощность 500 Вт; номинальное напряжение 24 В; запуск при скорости ветра 2 м/с; включение при скорости ветра 2.5 м/с; номинальная скорость ветра 12 м/с; рабочая температура от –40 до 60 °С; максимальная скорость ветра – 50 м/с; количество лопастей – 5; диаметр ротора – 1.55 м; обметаемая площадь – 1.89 м; габаритные размеры – 118 × 47 × 27 см.

С помощью одной ветроустановки высотой 5 м на острове можно получить электроэнергию 19.45 кВт·ч/м²·год, или в среднем 1.62 кВт·ч/м²·мес., а эквивалент

сокращения расхода топлива составляет 7.78 кг у. т.; экологический потенциал сокращения вредных выбросов: SO_2 – 0.161706 кг/год; NO_x – 0.087073 кг/год; CO – 0.011308 кг/год; CH_4 – 0.023747 кг/год; CO_2 – 12.43895 кг/год; твердых веществ – 0.016962 кг/год³⁾ [3, 14–16].

Согласно полученным результатам расчетов, при использовании солнечной радиации для экономии топлива возможно снижение себестоимости различных видов продукции и энергозатрат на ее получение, улучшение экологической обстановки и социально-бытовых условий Каспийского региона Туркменистана.

Статистический анализ условий

При составлении ТЭО и расчете мощности отопительных приборов, а также при расчете тепловых потерь в различных климатических условиях для строительства энергетических станций или сооружений можно применить уравнения регрессии [3–5, 10–12].

При составлении проектно-сметной документации и ТЭО для строительства различных солнечно-ветровых энергетических объектов необходимы гидрометеорологические данные Хазарского заповедника с количественными оценками их распределения, чтобы облегчить работу инженеров, сметчиков и проектировщиков.

Для обработки данных использовали методы математической статистики. Полученные данные аппроксимировали в виде упрощенной диаграммы рассеивания с использованием линейного уравнения регрессии в форме корреляционного эллипса. В прямоугольной системе координат уравнение линейной регрессии имеет вид $y = a + bx$, где a – свободный член регрессии; b – регрессионный коэффициент. Для аналитического исследования влияния падающей солнечной радиации на энергопроизводительность фотомодуля было разработано уравнение регрессии, учитывающее угол наклона: 0° (горизонтальное положение); 24° (для летнего периода); 54° (для зимнего); 39° (оптимальный для местности). Рассмотрены также средний, максимальный, минимальный температурные режимы, продолжительность солнечного сияния, скорость ветра, продолжительность пасмурных дней, количество осадков, температура почвы для прогнозирования энергопотенциала и расчета коэффициента детерминации, определяющего количественную оценку и тесноту связи переменных величин. Полученные результаты приведены в виде уравнений ниже.

Важным этапом регрессионного анализа является математическое выражение, связывающее значение зависимой случайной величины y и значение независимой величины x . В результате получили значение (y) зависимой переменной – угла наклона фотомодуля: на горизонтальной поверхности он составляет летом 24° , зимой 54° , оптимальный угол наклона в течение года 39° , а также значение (x) независимой переменной, то есть интенсивности падающей солнечной радиации на поверхность. Уравнения регрессий для углов наклона фотомодулей получены следующие:

$$\text{для } 24^\circ: y = 0.0004x + 0.1489; R = 0.0012; \quad (1)$$

$$39^\circ: y = 0.0008x + 0.1445; R = 0.0079; \quad (2)$$

$$54^\circ: y = 0.0005x + 0.1385; R = 0.0054; \quad (3)$$

$$0^\circ: \text{при горизонтальном положении} \\ y = -0.0007x + 0.1435; R = 0.0017. \quad (4)$$

Выработка электроэнергии солнечной установкой с одним фотомодулем:

$$y = -0.0098x + 3.628; R = 0.0018. \quad (5)$$

Уравнение регрессии для выработки тепловой энергии одним солнечным коллектором при нагреве воды:

$$y = -0.0239x + 8.7094; R = 0.0018. \quad (6)$$

Объем выработки теплой воды, м³:

$$y = -0.1885x + 77.435; R = 0.0015. \quad (7)$$

Выработка электроэнергии солнечной электростанцией с 10 фотомодулями мощностью 10 кВт:

$$y = 0.0164x + 4.9286; R = 0.0026. \quad (8)$$

Уравнение регрессии и коэффициент распространения средней скорости ветра:

$$y = -0.0038x + 3.4333; R = 0.0004. \quad (9)$$

Выработка электроэнергии одним ветрогенератором:

$$y = 0.0034x + 1.5988; R = 0.0074. \quad (10)$$

На основании данных научно-климатических справочников и данных, полученных от Государственной метеорологической службы, аналогично получили уравнения регрессий:

для времени солнечного сияния:

$$y = 0.0573x + 7.46, \quad (11)$$

продолжительности солнечного сияния:

$$y = 3.3776x + 200.88, \quad (12)$$

средней скорости ветра:

$$y = -0.007x + 5.7788, \quad (13)$$

количества пасмурных дней:

$$y = -0.1262x + 3.4621, \quad (14)$$

количества осадков:

$$y = -0.4336x + 11.485, \quad (15)$$

температуры почвы по месяцам года:

$$y = 0.6538x + 12.0. \quad (16)$$

При определении тесной взаимосвязи двух величин x и y для острова в течение года были получены следующие коэффициенты корреляции R для выработки солнечной энергии в электроэнергию: для одного фотомодуля – 0.0018, для теплового коллектора – 0.0018, для объема выработки теплой воды – 0.0015. Как видно, разброс взаимосвязи очень высокий [3–5, 17, 20].

Таким образом, с помощью полученных уравнений регрессии (1)–(16) можно прогнозировать предел промежуточного изменения в течение года следующих показателей: выработки электроэнергии солнечно-ветровыми электростанциями, средней скорости ветра, количества пасмурных дней, количества осадков, средней температуры воздуха, продолжительности солнечного сияния и температуры почвы.

Производительность преобразователей ВЭ и СЭ в тепловую и электрическую энергию и сокращение вредных выбросов в окружающую среду в год на острове

Productivity of wind and solar energy converters in terms of heat and electrical energy production and reduction of harmful emissions into the environment per year on the island

Преобразователь энергии / Energy converter	Технический потенциал, кВт·ч/год / Technical potential, kW·h per year	Эквивалент расхода топлива, кг у.т./год / Fuel consumption equivalent, kg fuel equivalent per year	Выбросы различных веществ, кг/год / Substances emission, kg per year					Твердые частицы / Solid particles
			SO ₂	NO _x	CO	CH ₄	CO ₂	
СЭС / Solar power plant	42.77	17.110	0.3556	0.1915	0.0248	0.0522	27.3529	0.0373
ВЭС / Wind power plant	19.45	7.780	0.1617	0.0870	0.0113	0.0237	12.4395	0.0169
ВН / Water heater	102.65	41.060	0.8534	0.4595	0.0596	0.1253	65.6483	0.0895
Итого / Total	164.87	65.948	1.3707	0.7381	0.0958	0.2012	105.440	0.1437

Обсуждение результатов

В результате исследования на основе справочных данных, системных теоретических и практических расчетов получены оценки солнечных энергетических ресурсов потенциалов на один квадратный метр площади: валового, технического и экономического потенциалов, преобразованных в тепловую и электрическую энергию, на территории о-ва Огурчинского в течение года. Определен средний приход в месяц прямого потока солнечной радиации при оптимальном угле наклона 39°, равный 1900.5 кВт·ч/(м²·мес.), средняя сумма поступления солнечной радиации на горизонтальную поверхность за 10-часовой интервал в сутки равна 1685.4 кВт·ч/м².

Полученные значения энергопроизводительности, экономического и экологического потенциалов фотомодуля (СЭС) марки *Sila solar* мощностью 30 Вт, площадью 0.24 м²; водонагревателя (ВН) теплопроизводительностью 44 °С марки *SCH-12* площадью 1.58 м²; ветроэлектростанции (ВЭС) мощностью 400 Вт приведены в таблице. Как следует из таблицы, рассчитан технический потенциал десяти фотомодулей площадью 0.24 м² и мощностью 60 Вт. Он составляет 42.77 кВт·ч/год, при этом экологический ресурсный потенциал солнечной энергии для преобразования в электрическую эквивалентен расходу

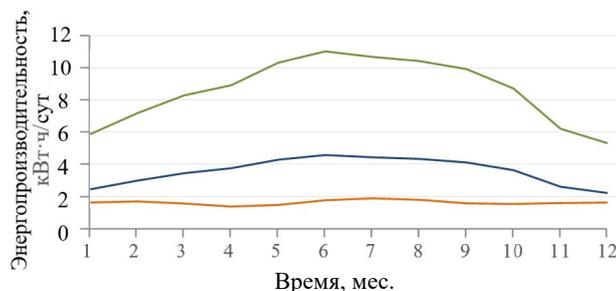
топлива 17.1 кг у. т/год. Технический потенциал одного водонагревателя марки SCH-12 с поглощающей площадью 1.58 м² для нагрева воды до 44 °С составляет 102.65 кВт·ч/год.

В итоге рассчитаны ожидаемые значения общей энергопроизводительности ВЭС и СЭС при преобразовании солнечной энергии в тепловую и электрическую (164.87 кВт·ч/(м²·год)) и сокращения вредных выбросов в окружающую среду в год: экономия расхода топлива – 65.948 л/год, сокращение выбросов: SO₂ – 1.3707 кг/год, NO_x – 0.7381 кг/год, CO – 0.09585 кг/год, CH₄ – 0.20129 кг/год, CO₂ – 105.4401 кг/год, твердых веществ – 0.14378 кг/год³) [9, 15, 16].

На рис. 6 приведена общая динамика среднесуточной энергопроизводительности ВЭС и СЭС при преобразовании гелиоэнергии в электрическую и выработки тепловой энергии по месяцам года.

В результате было определено, что при внедрении на острове 10 фотомодулей площадью 5.2 м² для проведения лабораторных исследований можно получить следующие результаты: сумма выработки электроэнергии за год составит 1829.2 кВт·ч, средняя месячная выработка – 60.4 кВт·ч, среднесуточная – 5.0 кВт·ч/сут. Экономия расхода топлива за месяц составит 24.16 кг у. т., сокращение вредных выбросов: SO₂ – 0.502163 кг/мес., NO_x – 0.270395 кг/мес., CO – 0.035116 кг/мес., CH₄ – 0.073744 кг/мес., CO₂ – 38.62791 кг/мес., твердых веществ – 0.052674 кг/мес.

Энергопроизводительность водонагревательной установки VSF-1 при нагреве воды до 44 °С составляет 914.52 м³/год, средняя выработка водонагревателя за месяц равна 76.21 м³.



Р и с . 6. Динамика среднесуточной энергопроизводительности ВЭС и СЭС при выработке электроэнергии и теплой воды на о-ве Огурчинском по месяцам: оранжевая линия – выработка ВЭ, синяя линия – выработка СЭ, зеленая линия – переработка СЭ в тепловую

F i g . 6. Dynamics of average daily energy productivity of wind and solar power plants during production of electricity and hot water on Ogurchinsky Island by months: orange line – wind energy production, blue line – solar energy production, green line – conversion of solar energy to heat

Для эффективного использования солнечно-энергетических технологических станций и установок в разное время года необходимо определить оптимальный угол наклона солнечного преобразователя с учетом географического расположения места. Расчет оптимального угла наклона солнечного приемника с ориентацией восток – запад по месяцам для острова составляет: для зимы – 54° (-0.82930 рад); для лета – 24° (0.42418 рад), оптимальный угол наклона 39° (0.26664 рад) в течение года.

При разработке СЭС с автоматизированным слежением за солнечной радиацией в зависимости от угла наклона для о-ва Огурчинского можно использовать графики на рис. 5 [2–4, 7].

Рассчитаны ожидаемые показатели экологических потенциалов сокращения вредных выбросов в окружающую среду при использовании солнечно-ветровых энергетических технологий в течение года для о-ва Огурчинского:

– СЭС: при годовой выработке электрической энергии 164.87 кВт·ч/($m^2 \cdot$ год), экономия расхода топлива составит 65.948 кг у. т/год, сокращение выбросов: SO_2 – 1.3707 кг/год, NO_x – 0.7381 кг/год, CO – 0.09585 кг/год, CH_4 – 0.20129 кг/год, CO_2 – 105.4401 кг/год, твердых веществ – 0.14378 кг/год [3, 4, 9, 16].

– ВН: при годовой выработке 102.65 кВт·ч/($m^2 \cdot$ год) экономия расхода топлива составит 41.06 кг у. т. в год, сокращение выбросов: SO_2 – 0.8534 кг/год, NO_x – 0.45953 кг/год, CO – 0.0596 кг/год, CH_4 – 0.1253 кг/год, CO_2 – 65.64826 кг/год, твердых веществ – 0.08952 кг/год.

– ВЭС: при годовой выработке электроэнергии 19.45 кВт·ч/($m^2 \cdot$ год) экономия расхода топлива составит 7.78 кг у. т. в год, сокращение выбросов: SO_2 – 0.161706 кг/год, NO_x – 0.087073 кг/год, CO – 0.011308 кг/год, CH_4 – 0.023747 кг/год, CO_2 – 12.43895 кг/год, твердых веществ – 0.016962 кг/год.

Результаты, полученные методами математической статистики уравнений регрессии (1)–(16), будут востребованы для внедрения солнечно-ветровых энергетических комплексов и электростанции в акватории южного сектора Каспийского моря.

Заключение

Определены энергоресурсы солнечной радиации, технические, экономические и экологические потенциалы с учетом гидрометеорологических и природно-климатических условий территории Хазарского заповедника в Каспийском море: продолжительности солнечного сияния, угла наклона к оптимально ориентированной поверхности приемника, часового угла движения солнечного склонения, прямой, рассеянной радиации и альбедо; среднемесячной и годовой температуры наружного воздуха, времени работы и энергетических параметров солнечной энергоустановки площадью 10.4 m^2 со среднегодовым оптимальным углом наклона 39° . Среднегодовая выработка электроэнергии, по нашим расчетам, составляет 10.03 кВт·ч/сут, суммарная выработка электроэнергии за год равна 3658.34 кВт·ч, экономия расхода органического топлива 1463.336 кг у. т/год, сокращение вредных выбросов в биосферу: SO_2 – 30.41 кг/год; NO_x – 16.38 кг/год; CO – 2.13 кг/год; CH_4 – 4.47 кг/год; CO_2 – 2339.64 кг/год; твердых веществ – 3.19 кг/год.

Стоимость одной СЭС энергопроизводительностью 10 кВт·ч/сут составит 12 673.9 долл. США. Средняя нагрузка на лабораторное помещение при использовании необходимых электроприборов – 10.03 кВт·ч/сут, стоимость 1 кВт·ч равна 0.055 долл. США без учета транспортных расходов на ввоз топлива по Каспийскому морю. По предварительным расчетам, срок окупаемости фотоэлектрической СЭС составит 5 лет 6 мес., рентабельность СЭС 6.76 %, чистая прибыль за 10 лет достигнет 2234.01 долл. США.

Полученные результаты подтверждают: использование солнечно-ветрового энергетического ресурсного потенциала будет приоритетным, перспективным, экологически чистым и экономически выгодным вариантом для электроснабжения, энергообеспечения и других районов побережья Каспийского моря.

Полученные результаты уравнения регрессии (1)–(16) будут полезными для составления проектно-сметной документации и ТЭО для внедрения солнечно-ветровых энергетических технологий в регионе.

Применение данных технологий позволит решить целый ряд задач по энергообеспечению Хазарского заповедника на о-ве Огурчинском. Использование современных электронных технологий позволит получить более достоверные результаты наблюдения за флорой, фауной, сохранит биологические ресурсы и биоразнообразие, позволит улучшить социально-бытовые условия жизнедеятельности работников и жителей острова и снизить антропогенную нагрузку на экосистему. Все это будет способствовать выполнению Национальной, Государственной энергетической, социально-экономической и экологической программ устойчивого развития Туркменистана, а также Парижского соглашения об изменении климата, решений 28-й сессии Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP28) и ряда других государственных и международных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бердымухамедов Г. М.* Туркменистан на пути достижения Целей устойчивого развития. Ашхабад : Туркменская государственная издательская служба, 2018. 465 с.
2. *Пенджиев А. М., Астанов Н. Г., Пенджиев М. А.* Использование солнечно-энергетических установок в заповедных зонах для улучшения аридной экосистемы Туркменистана // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2011. № 12. С. 38–45. EDN ONWBGD.
3. *Пенджиев А. М.* Экоэнергетические ресурсы возобновляемых источников энергии. Москва : Русайнс, 2023. 400 с. EDN WFQLSW.
4. *Стребков Д. С., Пенджиев А. М., Мамедсахадов Б. Д.* Развитие солнечной энергетики в Туркменистане. Москва : ГНУ ВИЭСХ, 2012. 498 с. EDN QMLYYR.
5. *Penjiyev A. M.* Wave energy resources of the Caspian Sea on the coast of Turkmenistan // *Applied Solar Energy*. 2022. Vol. 58, iss. 2. P. 306–310. <https://doi.org/10.3103/s0003701x22020141>
6. *Спутниковый мониторинг Туркменистана / А. Г. Костяной [и др.]*. Москва : Сигнал, 2011. 16 с. EDN RYWWYP.
7. *Лебедев С. А.* Модель средней высоты морской поверхности Каспийского моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. № 3. С. 224–234. EDN PVMRVN.
8. *Нефедова Л. В., Тетерина Н. В.* Оценка экологического эффекта на окружающую среду при организации энергообеспечения заповедников с использованием ВИЭ // *Ecological Studies. Hazards. Soltions*. 2010. Т. 16. С. 48–52.

