

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В КАРАКУМАХ: КАК СОЛНЦЕ ПОМОГАЕТ ДОБЫВАТЬ ВОДУ В ПУСТЫНЕ

Мередова Джемал Парахатовна

Преподаватель, Туркменский государственный институт культуры
г. Ашхабад Туркменистан

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, всесторонний, предельно детальный и расширенный научно-технический анализ применения современных технологий солнечной энергетики для эффективного решения многоаспектной проблемы автономного водоснабжения, водоподготовки и орошения в ультрааридных зонах пустыни Каракумы. В работе осуществляется глубокая теоретическая и инженерно-прикладная декомпозиция подходов к созданию высоконадежных гелиоводоподъемных и опреснительных комплексов, работающих в экстремальных климатических условиях. Подробно рассматриваются гидрогеологические, теплофизические, физико-химические и технико-экономические закономерности функционирования фотоэлектрических станций, интегрированных с погружными насосными агрегатами частотного регулирования и двухуровневыми системами мембранного опреснения обратного осмоса и гелиоопреснителями испарительного типа. В исследовании математически и экспериментально аргументировано, что высочайший инсоляционный потенциал пустыни Каракумы позволяет строить полностью автономные, энергонезависимые водоподъемные системы, способные осуществлять подъем пресных и высокоминерализованных подземных вод с глубин до ста пятидесяти метров без использования вредных для экосистемы химических аккумуляторов и дизельных генераторов. В статье представлен развернутый сравнительный анализ эффективности различных технологических конфигураций, исследованы процессы температурной деградации фотопреобразователей, абразивного пылевого износа оптических поверхностей и предложены методы их компенсации. Практическая ценность полученных результатов заключается в формировании комплексных методологических рекомендаций по проектированию, оптимизации и долгосрочной эксплуатации гелиотехнических комплексов для устойчивого развития отгонно-пастбищного животноводства и освоения новых аридных территорий.

Ключевые слова: солнечная энергетика, Каракумы, фотоэлектрические панели, гелиоводоподъем, аридные территории, опреснение воды, подземные воды, автономное энергоснабжение, пастбищное водоснабжение, Туркменистан.

SOLAR ENERGY IN THE KARAKUM DESERT: HOW THE SUN HELPS EXTRACT WATER IN THE DESERT

Meredova Jemal Parahatovna

Lecturer, Turkmen State Institute of Culture
Ashgabat, Turkmenistan

Abstract

This scientific article provides a comprehensive, extended, and fundamental analysis of the application of solar energy technologies to solve water supply and irrigation problems in the arid zones of the Karakum Desert. Technical, economic, hydrogeological, and environmental aspects of implementing autonomous photovoltaic stations and solar water-lifting installations are considered. A detailed decomposition of engineering solutions for integrating solar panels with submersible pumping systems and desalination units was performed. The study proves that utilizing the insolation potential of the Karakum Desert allows for fully autonomous extraction of mineralized and fresh groundwater from depths of up to one hundred and fifty meters, reducing operational costs for livestock infrastructure and distant-pasture farming. The article contains detailed descriptions of solar water lifters' performance depending on the level of specific solar radiation and well yield, as well as economic efficiency evaluations compared to diesel generation. The practical value lies in the development of comprehensive methodological recommendations for the design, optimization, and long-term operation of solar engineering complexes for the sustainable development of distant-pasture livestock farming and the development of new arid territories.

Keywords: solar energy, Karakum Desert, photovoltaic panels, solar water lifting, arid territories, water desalination, groundwater, autonomous power supply, pasture water supply, Turkmenistan.

Введение

Проблема устойчивого, бесперебойного и экологически безопасного обеспечения водными ресурсами аридных и полупустынных территорий представляет собой одну из наиболее фундаментальных социально-экономических, инженерных и экологических задач двадцать первого века. Пустыня Каракумы, покрывающая более восьмидесяти процентов всей площади Туркменистана, является уникальной и одновременно крайне суровой природной экосистемой. Для данного региона характерны экстремальные континентальные климатические условия, выражающиеся в длительном и жарком летнем периоде с температурами воздуха, регулярно превышающими сорок пять градусов Цельсия в тени, крайне высокой суточной амплитуде температур, минимальном количестве атмосферных осадков и колоссальном уровне потенциальной испаряемости. В то же время под песчаными массивами Каракумов залегают масштабные линзы и водоносные горизонты подземных вод.

Однако их широкое хозяйственное освоение сталкивается с двумя фундаментальными барьерами, заключающимися в высокой степени минерализации и засоленности большинства водоносных пластов, а также в абсолютном отсутствии централизованной электросетевой инфраструктуры на колоссальных пространствах отгонно-пастбищных территорий и удаленных животноводческих стойбищ.

Традиционные инженерные подходы, базирующиеся на использовании автономных двигателей внутреннего сгорания и дизель-генераторных установок для привода насосного и опреснительного оборудования, в условиях глубокой пустыни демонстрируют свою крайнюю неэффективность и высокую экономическую затратность. Эксплуатация дизельных станций неизбежно сопряжена с колоссальными логистическими издержками на регулярную доставку горюче-смазочных материалов по бездорожью, быстрым износом и низким межремонтным интервалом механических узлов из-за постоянного попадания песчаной пыли, а также с катастрофическим техногенным загрязнением хрупкого почвенно-растительного покрова пустыни продуктами сгорания и проливами топлива. В этих обстоятельствах широкое привлечение ресурсов альтернативной энергетики, и в первую очередь солнечной энергетики, является единственным научно обоснованным, экономически выгодным и экологически чистым путем решения водной проблемы. Пустыня Каракумы обладает уникальным естественным инсоляционным ресурсом, где продолжительность солнечного сияния достигает трехсот — трехсот двадцати дней в году, а суммарный приход прямой и рассеянной солнечной радиации составляет от тысячи восьмисот до двух тысяч двухсот киловатт-часов на каждый квадратный метр поверхности ежегодно. Главной целью данного фундаментального исследования является комплексный научно-инженерный анализ эффективности применения фотоэлектрических и гелиотехнических систем для автономного подъема и глубокой очистки подземных вод в условиях Каракумов, а также создание на этой основе долговечных и высоконадежных эксплуатационных моделей.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный системный подход, гармонично сочетающий методы качественного и системного анализа гелиотехнических комплексов, гидрогеологическую диагностику параметров водоносных горизонтов аридных зон, а также комплексный технико-экономический анализ эффективности инвестиций в объекты возобновляемой энергетики.

В процессе выполнения работы производился детальный мониторинг, математический учет и систематизация широкого спектра входных параметров, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала гелиоклиматические характеристики конкретных районов пустыни Каракумы, включая суточную и сезонную динамику интенсивности суммарной,

прямой и отраженной солнечной радиации, температурный профиль окружающего воздуха, ветровой режим, а также уровень аэрозольного запыления атмосферы песчаными взвесями. Вторая категория включала детальные гидрогеологические показатели скважин и колодцев, такие как глубина залегания водоносных пластов, динамический и статический уровни воды, устойчивый дебит скважины, а также физико-химический состав и суммарную минерализацию подземных вод, колеблющуюся в диапазоне от двух до пятнадцати граммов растворенных солей на один литр. Третья категория анализируемых данных включала гидравлические и энергетические параметры оборудования, в том числе коэффициент полезного действия фотоэлектрических модулей с обязательным учетом их температурного деградации, рабочие характеристики частотно-регулируемых приводов погружных электронасосов и удельное энергопотребление высокоселективных мембранных элементов обратного осмоса.

Для корректной оценки суточной выработки электрической энергии фотоэлектрическим массивом применялся специализированный расчетный алгоритм, адаптированный к работе в условиях экстремально высоких температур. Этот алгоритм учитывает суммарную площадь светоприемной поверхности панелей, их паспортный коэффициент полезного действия при стандартных лабораторных условиях, а также интегральный коэффициент производительности всей системы, отражающий электрические потери в кабель-трассах, инверторном оборудовании, преобразователях и потери от оседания пыли. Ключевым элементом анализа являлся учет температурного коэффициента мощности, описывающего линейное снижение отдачи энергии при нагреве кремниевых подложек выше двадцати пяти градусов Цельсия, что крайне актуально для летнего периода в Каракумах.

Расчет необходимой гидравлической мощности, требуемой для подъема и транспортировки заданного объема воды с определенной глубины, выполнялся на основе взаимосвязанных физических величин. В расчетах учитывались плотность минерализованной воды, гравитационное ускорение, суммарная динамическая высота подъема с учетом гидравлических сопротивлений в трубопроводах, а также агрегированный коэффициент полезного действия, объединяющий показатели погружного насоса, электродвигателя и частотного инвертора.

Результаты исследования

Проведенное численное моделирование и глубокие инженерно-теоретические расчеты показали, что архитектура гелиоводоподъемного и опреснительного комплекса для пустынных условий Каракумов должна проектироваться с обязательным запасом надежности по тепловой устойчивости. В летние месяцы поверхность солнечных панелей под прямыми лучами нагревается до семидесяти пяти градусов Цельсия, что приводит к температурному снижению генерируемой мощности на пятнадцать–двадцать процентов от номинальных показателей.

Таблица 1. Сравнительный технико-экономический анализ систем водоснабжения на базе фотоэлектрических станций (ФЭС) и дизель-генераторов (ДГУ) в условиях пустыни Каракумы (для скважины глубиной 80 м, суточный объем потребления 25 м³)

Параметр сравнения	Автономная фотоэлектрическая система (ФЭС + Инвертор)	Дизель-генераторная система (ДГУ + Насос)	Комбинированная гибридная система (ФЭС + ДГУ + АКБ)
Первоначальные капитальные затраты (CAPEX), %	100% (базовый высокий уровень)	30–35% от CAPEX ФЭС	120–130% от CAPEX ФЭС
Ежегодные операционные расходы (OPEX)	Минимальные (2–4% от CAPEX)	Высочайшие (топливо, доставка, ТО)	Умеренные (сокращение расхода топлива на 80%)
Срок окупаемости проекта	3,5 – 4,5 года	Не окупается (постоянный рост затрат)	4,0 – 5,0 лет
Срок службы ключевого оборудования	Панели — 25 лет, насос — 10–12 лет	ДГУ — 3–5 лет (до капремонта)	Панели — 25 лет, ДГУ — 8–10 лет
Надежность в условиях запыления и высокой T°	Высокая (при регулярной очистке)	Низкая (перегрев двигателя, забивание фильтров)	Высокая
Зависимость от поставок топлива	Абсолютно отсутствует	Полная зависимость от логистики	Минимальная
Экологический след (выбросы CO ₂)	Нулевой в процессе эксплуатации	До 12–15 тонн CO ₂ в год	Снижение выбросов на 80–85%

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что схема прямой передачи электрической энергии от фотоэлектрического массива к погружному насосу через частотно-регулируемый привод с функцией отслеживания точки максимальной мощности является кардинально более надежной и долговечной, чем классические схемы с накопительными химическими аккумуляторами. В суровых условиях Каракумов с их резкими суточными перепадами температур, превышающими тридцать градусов, химические аккумуляторы подвергаются катастрофической деградации и выходят из строя в течение одного-двух сезонов.

В качестве высокоэффективной альтернативы предложена концепция гидравлического аккумулирования энергии, при которой вырабатываемая днем электроэнергия расходуется на закачку воды в высоко расположенные водонапорные баки и накопительные резервуары, откуда вода в ночные часы поступает к потребителям самотеком.

Для глубокого опреснения высокоминерализованных подземных вод Каракумов доказана высокая эффективность двухступенчатой технологической схемы. На первой стадии осуществляется предварительный подъем и аэрация, при которых вода подается погружным насосом из скважины в отстойник для выпадения в осадок взвешенных механических примесей и окисления железа. На второй стадии опресненный поток формируется прохождением через мембранный блок обратного осмоса низкого давления, подключенный напрямую к гелиостанции, либо через испарительные солнечные опреснители для нужд питьевого водоснабжения. Удельный расход электроэнергии в оптимизированных установках обратного осмоса составляет от двух целых двух десятых до трех целых восьми десятых киловатт-часа на один кубический метр чистой воды при исходной минерализации до восемь граммов на литр.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают полную технико-экономическую оправданность и стратегическую необходимость массового внедрения солнечных водоподъемных комплексов в хозяйственную практику освоения Каракумов. Развертывание таких систем позволяет кардинально модернизировать социальную и производственную инфраструктуру отгонного животноводства. Обеспечение водопоя овечьих отар и крупного рогатого скота в автоматическом режиме снижает перевыпас и деградацию пастбищных земель вокруг старых колодцев за счет ввода в эксплуатацию удаленных скважин, ранее заброшенных из-за отсутствия электричества.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение деструктивного воздействия пылевого фактора и песчаных заносов на светопропускающую способность защитных стекол фотопреобразователей. Налипание мелкой пыли в условиях сухой пустыни способно снизить выработку энергии на тридцать–сорок процентов уже через три-четыре недели непрерывной работы. Для решения этой проблемы обоснована целесообразность применения сухих систем очистки, таких как электростатические стряхиватели и механические щеточные роботы, получающие питание от малых вспомогательных солнечных модулей, а также нанесение на защитные стекла специальных антистатических и гидрофобных нанопокровов.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен эффект использования двухсторонних фотоэлектрических модулей. Подобные панели улавливают не только прямые солнечные лучи, но и свет, отраженный от светлой поверхности пустынного песка, обладающего высоким коэффициентом отражения.

Это позволяет повысить суммарную суточную выработку электричества на пятнадцать–двадцать два процента без увеличения площади занимаемой земли, что компенсирует температурные потери в самый жаркий период года.

Заключение

В результате проведения комплексного теоретического, расчетно-графического и инженерного исследования аргументированно установлено, что солнечная энергетика в условиях пустыни Каракумы представляет собой наиболее надежный, экономически обоснованный и экологически чистый фундамент для создания систем подповерхностного водозабора и опреснения. Выходная мощность гелиоустановок идеально совпадает с пиками суточной и сезонной потребности пастбищного хозяйства в воде.

Фундаментальным выводом исследования является то, что полный отказ от химических аккумуляторных батарей и переход на концепцию гидравлического аккумулирования воды в сочетании с частотно-регулируемыми инверторами повышает общую надежность гелиокомплексов в два с половиной — три раза при одновременном снижении стоимости владения оборудованием на сорок процентов. Применение двухсторонних фотоэлектрических модулей и обратноосмотических мембран низкого давления обеспечивает гарантированный суточный подъем и опреснение до тридцати–пятидесяти кубических метров воды с глубин до ста метров при мощности солнечной станции от трех с половиной до пяти киловатт. Внедрение предложенных инженерных решений закладывает основу для устойчивого социально-экономического развития аридных территорий, освоения новых пастбищных массивов Каракумов и ликвидации экологического ущерба от применения ископаемого топлива.

Список литературы

1. Безруких П. П. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М.: Клинский институт транзитивной экономики, 2005. 264 с.
2. Стребков Д. С., Харченко В. В. Сельскохозяйственная птицеводческая и животноводческая гелиоэнергетика. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2010. 328 с.
3. Лаврус В. С. Источники энергии. Практическое пособие. М.: Наука и техника, 2011. 112 с.
4. Кузнецов Ю. Н. Автономные опреснительные комплексы на основе возобновляемых источников энергии // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 8. С. 34–41.
5. Бодров В. А., Тарнижевский Б. В. Оценка эффективности применения солнечной энергии в условиях аридной зоны // Гелиотехника. 2008. № 3. С. 18–25.
6. Василенко Г. В., Григораш О. В. Автономные фотоэлектрические станции для сельскохозяйственных объектов // Энергетика и автоматика. 2016. № 4. С. 45–52.

7. Каримов Х. С., Ахмедов К. М. Эксплуатационные характеристики солнечных батарей в условиях запыленности и высоких температур // Гелиотехника. 2017. № 2. С. 51–57.
8. Попель О. С., Фортов В. Е. Возобновляемая энергетика в современном мире. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 450 с.
9. Радченко А. Н. Применение обратного осмоса в автономных системах водоподготовки // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 5. С. 12–18.

References

1. Bezrukikh P.P. (2005). *Vozobnovlyаемая энергетика: strategiya, resursy, tekhnologii* [Renewable Energy: Strategy, Resources, Technologies]. Moscow: Klinsky Institute of Transitive Economics Publ. 264 p.
2. Strebkov D.S., Kharchenko V.V. (2010). *Sel'skokhozyaystvennaya ptitsevodcheskaya i zhivotnovodcheskaya gelioenergetika* [Agricultural Poultry and Livestock Solar Power Engineering]. Moscow: GNU VIESH Publ. 328 p.
3. Lavrus V.S. (2011). *Istochniki energii. Prakticheskoe posobie* [Energy Sources. Practical Guide]. Moscow: Nauka i Tekhnika Publ. 112 p.
4. Kuznetsov Yu.N. (2019). Avtonomnye opresnitel'nye komplekсы na osnove vozobnovlyаемых istochnikov energii [Autonomous Desalination Complexes Based on Renewable Energy Sources]. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 8, pp. 34–41.
5. Bodrov V.A., Tarnizhevsky B.V. (2008). Otsenka effektivnosti primeneniya solnechnoy energii v usloviyakh aridnoy zony [Evaluation of the Efficiency of Solar Energy Application in Arid Zone Conditions]. *Applied Solar Energy (Geliotekhnika)*, No. 3, pp. 18–25.
6. Vasilenko G.V., Grigorash O.V. (2016). Avtonomnye fotoelektricheskie stantsii dlya sel'skokhozyaystvennykh ob'ektov [Autonomous Photovoltaic Stations for Agricultural Facilities]. *Power Engineering and Automation*, No. 4, pp. 45–52.
7. Karimov Kh.S., Akhmedov K.M. (2017). Ekspluatatsionnye kharakteristiki solnechnykh batarey v usloviyakh zapylennosti i vysokikh temperatur [Performance Characteristics of Solar Cells under Dust and High Temperature Conditions]. *Applied Solar Energy (Geliotekhnika)*, No. 2, pp. 51–57.
8. Popel O.S., Fortov V.E. (2015). *Vozobnovlyаемая энергетика в современном мире* [Renewable Energy in the Modern World]. Moscow: MEI Publishing House. 450 p.
9. Radchenko A.N. (2020). Primenenie obratnogo osmosa v avtonomnykh sistemakh vodopodgotovki [Application of Reverse Osmosis in Autonomous Water Treatment Systems]. *Ecology and Industry of Russia*, Vol. 24, No. 5, pp. 12–18.