

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОЛНЕЧНО-ВОДОРОДНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

*А. Я. Джумаев, к. ф.-м. н., проректор по научной работе, Государственный энергетический институт Туркменистана, Мары, Туркменистан,
e-mail: a.jumayev.tm@gmail.com*

А. С. Какабаев, директор, Марыйская финансово-экономическая средняя профессиональная школа, Мары, Туркменистан

Реферат

«Зеленый» водород является многообещающим решением для декарбонизированной энергетической системы. В статье предлагается пилотный проект солнечно-водородной системы для энергоснабжения удаленных населенных пунктов. В работе разработана система энергоснабжения состоящей из источника электроэнергии – фотоэлектрической солнечной станции установленной мощностью 1,5 МВт, системы получения водорода – электролизера мощностью 1 МВт и 2G генератора с мощностью 115 кВт, а также приведена оценка экономической целесообразности производства «зеленого» водорода.

Ключевые слова: фотоэлектрическая солнечная станция, электролизер, водородная энергия, аккумулирование энергии Power-to Gas (электроэнергия в газ).

TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF SOLAR-HYDROGEN SYSTEM FOR ENERGY SUPPLY TO REMOTE COMMUNITIES

A. Ya. Jumayev, A. S. Kakabayev

Abstract

Green hydrogen is a promising solution for a decarbonized energy system. The article recommends the pilot project solar-hydrogen system for energy supply to remote communities. Current work presents a modelling project, which consists of electric power source – photovoltaic solar station (PVS) with a capacity of 1,5 MW, system of generation of hydrogen (electrolyzer with a capacity 1 MW) and 2G generator with a capacity 115 kW and also provides an assessment of the economic feasibility of producing «green» hydrogen.

Keywords: photovoltaic solar station, electrolyser, hydrogen energy, Power-to Gas generator.

Введение

В свете ожидаемых изменений и перспектив развития в энергоснабжении очень важная роль отводится исследованиям, направленным на использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ), на поиск способов сезонных накоплений энергии и выбор оптимальных способов их производства и использования. Результаты исследования многих ученых показывают, что водород является топливом будущего и как энергоноситель в скором будущем может способствовать решению основных задач перспективного энергоснабжения.

Постановлением Президента Туркменистана от 28 января 2022 года была принята Дорожная карта по развитию международного сотрудничества Туркменистана в области водородной энергии на 2022–2023 гг. В рамках этой Дорожной карты планируется реализовать 18 проектов и мероприятий, в частности, разработать Национальную стратегию развития водородной энергетики в Туркменистане [1]. В рамках реализации Национальной стратегии по развитию возобновляемой энергетики до 2030 года [2], утвержденной постановлением Президента Туркменистана от 4 декабря 2020 года, намечен перечень мер поддержки развития возобновляемых источников энергии, в частности, в направлении развития мини- и микроэлектросетей в удаленных районах будут реализованы следующие меры:

- определение целевых показателей электрификации удаленных районов с использованием автономных систем, мини- и микроэлектросетей;
- разработка нормативных правовых актов, определяющих порядок землеотвода под линии электропередач (опоры линий электропередачи);
- разработка типовых проектов мини- и микроэлектросетей для использования в изолированных районах;
- разработка и производство модульных решений для строительства мини- и микроэлектросетей в изолированных районах;
- разработка упрощенного порядка получения разрешения на строительство мини- и микроэлектросетей в изолированных районах в случае использования типовых проектов и модульных решений;
- определение налоговых льгот, включая льготы на землю, при строительстве мини- и микроэлектросетей в удаленных районах.

В рамках реализации ЦУР ООН предлагается проект обеспечения электрической и тепловой энергии удаленных от центральной системы энергообеспечения населенных пунктов за счет «зеленого» водорода производимого на основе фотоэлектрической солнечной станции.

ЦУР 7. Обеспечение доступа к недорогостоящим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех. В условиях Туркменистана:

- это обеспечение электроснабжения для потребителей удаленных населенных пунктов (пограничные заставы, чабанские селения, хозяйства земледельцев);
- обеспечение недорогого тепло- и хладоснабжения, горячего водоснабжения;
- экспорт электроэнергии в энергодефицитные страны.

Методы исследования, теоретическая база

В разработке проекта использовали методику, предложенную в работе [3]. Для оценки перспектив совместной работы источников солнечной энергии и электролизера для производства водорода для системы энергоснабжения удаленных населенных пунктов в качестве источника электрической энергии была выбрана фотоэлектрическая солнечная станция (ФСС) установленной мощностью 1,5 МВт в населенном пункте Ахалского велаята Гокдепинского этрапа. Принято, что потребителями ФСС являются только электролизер и потребители населенного пункта. В расчетах использовали технические данные электролизера с мощностью 1 МВт (таблица 1). Был выполнен расчет объема электрической энергии, вырабатываемой такой ФСС в течении года

$$E = E_{удел, \beta} \cdot S = \sum_{i=1}^{12} E_{i, \beta} \cdot \eta_p \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_m \cdot S, \quad (1)$$

где E – выработка ФСС в год; $E_{удел,\beta}$ – удельная выработка ФСС с учетом наклона β в течении года; S – площадь ФСС; $E_{i,\beta}$ – приход солнечной энергии на оптимально ориентированную площадку с углом наклона $\beta = 36^\circ$ на широтах расположения ФСС в i -том месяце. Потери η_p на ФСС составляет до 25 %, а КПД η_{inv} преобразования из постоянного в переменный ток составляет 98,8 %, принятый КПД η_m солнечного модуля 19,2 %.

Таблица 1 – Технические характеристики электролизерной установки с мощностью 1 МВт

Технические характеристики	Значение и единица измерения
Номинальная мощность	1 МВт
Производительность по водороду	300 Нм ³ /ч или 27кг/ч
Регулирование производительности по водороду	15–100 %
Удельный расход электроэнергии	4,4 кВт·ч/Нм ³ или 48,88 кВт·ч/кг
Давление водорода на выходе	30–200 кгс/см ²
Удельная плотность водорода	0,08988 кг/Нм ³
Нижняя теплотворная способность (НТС)	119,96 МДж/кг (т. е. 33,32 кВт·ч/кг или 3,00 кВт·ч/Нм ³)

В ходе вычислений были приняты следующие допущения:

- количество часов работы электролизера с установленной максимальной; производительностью в день: декабрь – 2 часа; январь, февраль, март, ноябрь – 3 часа; апрель, май, сентябрь, октябрь – 4 часов; июнь, июль, август – 5 часов.

- количество суммарной солнечной энергии, поступающей на поверхность солнечной панели, расположенной в населенном пункте под углом наклона $\beta = 36^\circ$ южной ориентации: Гокдепе, Ахалский веляят – 1803,932 кВт·ч/м² год.

Мощность электролизера была выбрана исходя из того, что ФСС будет покрывать его потребности в электроэнергии, следовательно производство водорода будет зависеть от выработки и режима работы ФСС. Исходя из этого, было решено выбрать электролизер мощностью 1 МВт. Определен баланс энергии, вырабатываемой и потребляемой элементами системы получения водорода (рисунок 1).

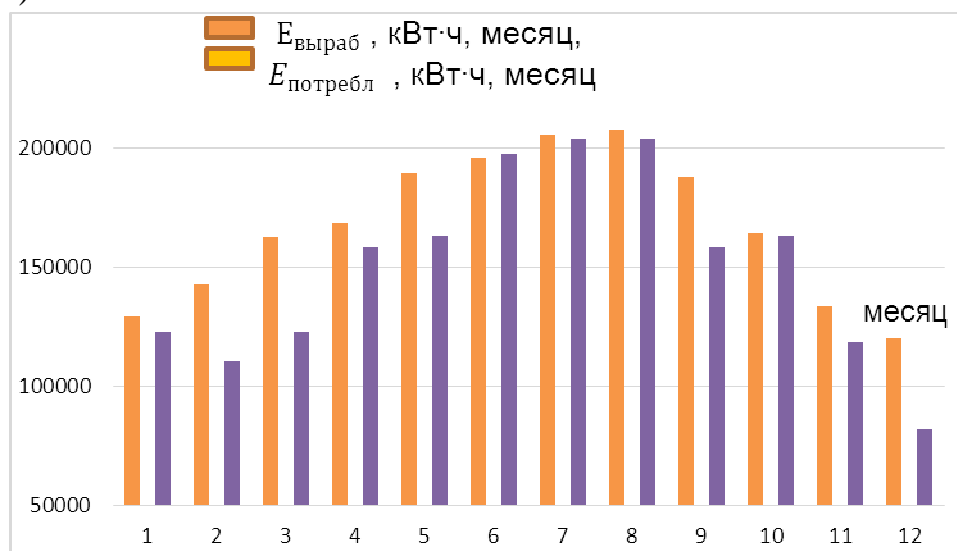


Рисунок 1 – Вырабатываемая электрическая энергия ФСС и потребляемая энергия электролизера

С использованием данных, приведенных в таблице 1, была рассчитана масса водорода (рисунок 2), получаемая выбранным электролизером соответствующей мощностью

$$m = \sum_{i=1}^{12} m_i = \sum_{i=1}^{12} \eta_{эл} \cdot t_i \cdot N_i, \quad (2)$$

где m – масса полученного водорода в течении года; m_i – масса водорода, получаемая электролизером в i -том месяце; $\eta_{эл}$ – эффективность работы электролизера; t_i – количество часов работы электролизера с установленной максимальной производительностью в день; N_i – количество дней в месяц.

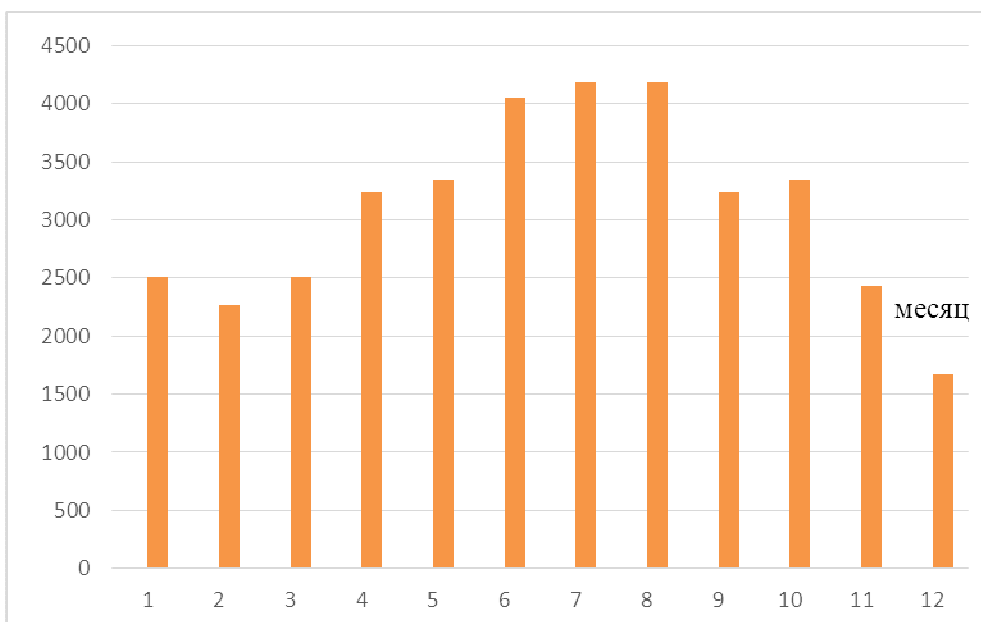


Рисунок 2 – Производство зеленого водорода в течении года

На рисунке 3 приведена общая схема солнечно-водородной системы для энергоснабжения удаленных населенных пунктов, а также на рисунке 4 приведена общая схема ФСС с мощностью 1,5 МВт.

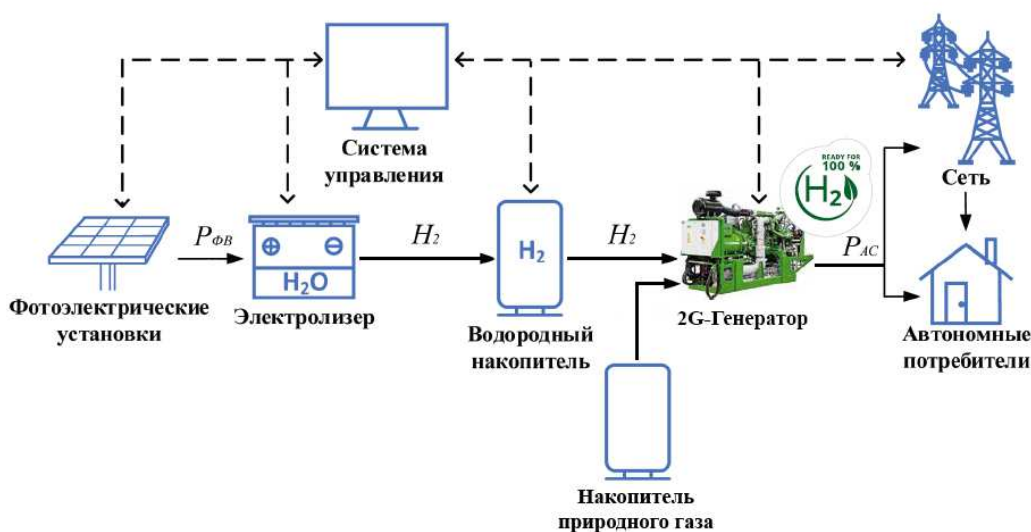


Рисунок 3 – Общая схема солнечно-водородной системы для энергоснабжения удаленных населенных пунктов

Результаты и обсуждение

В статье рассматривается солнечно-водородная система энергоснабжения для удаленных населенных пунктов, состоящая из ФСС и системы производства, хранения и энергетического использования водорода (рисунок 3). Определен баланс энергии, вырабатываемой и потребляемой элементами системы получения водорода (рисунок 1).

В работах [4, 5] рассматривается солнечно-водородная энергетическая система для Саудовской Аравии и анализ эффективности аккумулирования электрической энергии и водорода в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии. Как видно из общей схемы ФСС с мощностью 1,5 МВт (рисунок 4) предлагаемая станция состоит из пяти основных базовых блоков с мощностью 300 кВт. В таблицах 2 и 3 приведены технические характеристики основного базового блока и ФСС мощностью 1,5 МВт.

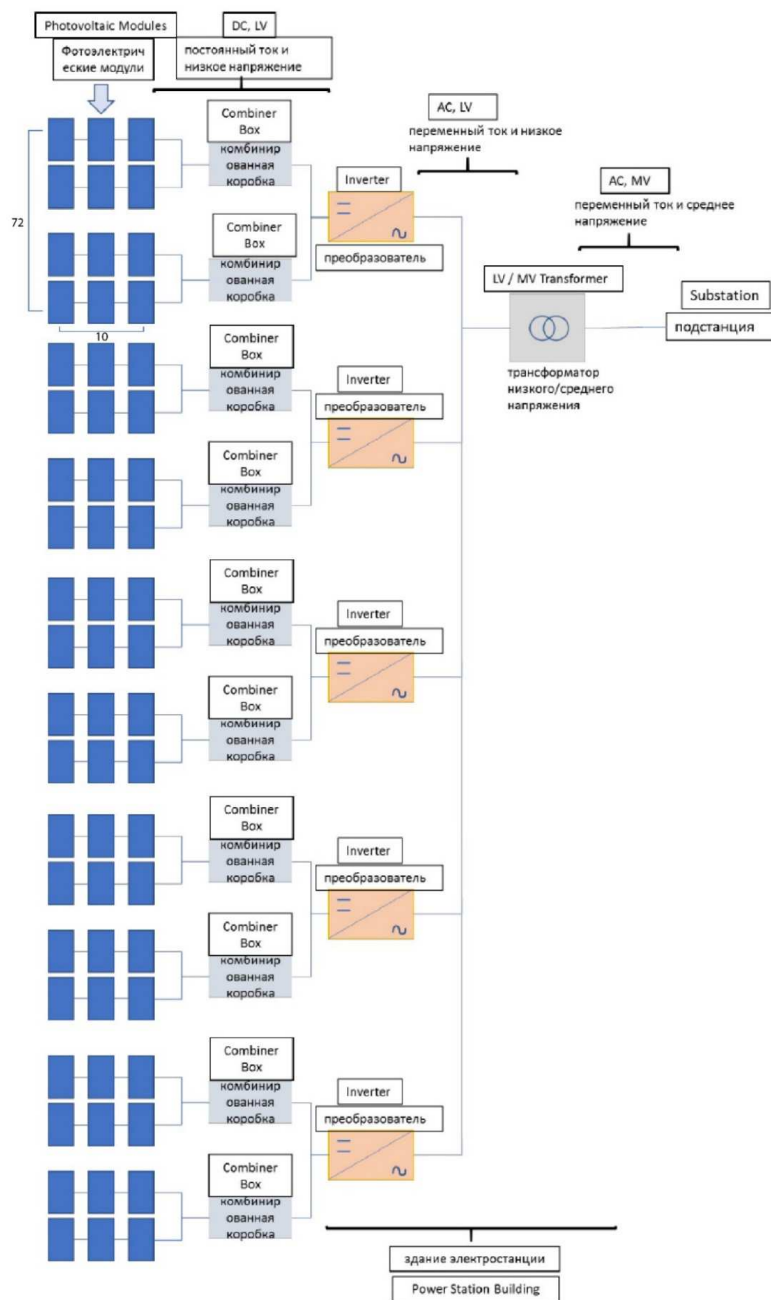


Рисунок 4 – Общая схема ФСС с мощностью 1,5 МВт

Таблица 2 – Технические характеристики основного базового блока

1	Мощность ФСС	300 кВт
2	Мощность фотоэлектрического модуля	415 Вт
3	Количество фотоэлектрических модулей	720
4	Количество фотоэлектрических модулей соединенных последовательно в ряду	10
5	Количество рядов	72
6	Площадь фотоэлектрических модулей	1557 м ²
7	Количество инверторов	1
8	Номинальная мощность инвертора	300 кВт

Таблица 3 – Технические характеристики ФСС мощностью 1,5 МВт

1	Мощность ФСС	1,5 МВт
2	Количество основных базовых блоков	5
3	Мощность основного базового блока ФСС	300 кВт
4	Мощность фотоэлектрического модуля	415 Вт
5	Количество фотоэлектрических модулей	3600
6	Количество фотоэлектрических модулей соединенных последовательно в ряду	10
7	Количество рядов	360
8	Площадь фотоэлектрических модулей	7785 м ²
9	Количество инверторов	5
10	Выработка электроэнергии за год	2,006·10 ⁶ кВт·ч

В пилотном проекте рассматривается строительство фотоэлектрической солнечной станции (ФСС) установленными мощностями 1,5 МВт в Ахалском велаяте в населенном пункте Гокдепинского этрапа. Основные результаты осуществления пилотного проекта приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные результаты пилотного проекта

Технические параметры и информация	Значение и единица измерения
Населенных пункт	Ахалский велаят Гокдепинский этрап село Бори
Количество домов	238
Суточное потребление электрической энергии	3570 кВт·ч
Годовое потребление электрической энергии	1303050 кВт·ч
Выработка электрической энергии ФЭС с мощностью 1500 кВт	2006874 кВт·ч
Производства зеленого водорода в течении года	36990 кг
Избыточная производства электрической энергии ФСС	703824 кВт·ч
Сезонное производство зеленого водорода в течении года	14422 кг

В летнее время ФСС производит избыточное количество электроэнергии, превышающее потребность в ней. В нашей системе избыточная электроэнергия поступает в электролизер и используется для производства водорода. Водород хранится в водородном накопителе, а затем, когда выработка ФСС недостаточна для электроснабжения потребителей, используется 2G генератор, который может работать в различных видах топлива, в частности, может работать на природном газе, смеси природного газа и водорода и на чистом водороде.

Перечень ориентировочных статей расходов при строительстве пилотного проекта

Более точно оценить капитальные вложения в солнечно-водородную электростанцию в селе Бори можно только при наличии более детальной информации, такой как стоимость оборудования, заявленная поставщиком, и строительные материалы, стоимость проектирования объекта и строительномонтажных работ, земельные расходы, расходы на налоги и разрешительные документы и др. Однако можно предоставить общий план расходов, куда входит стоимость солнечных панелей, инверторов, оборудования для электролиза и хранения водорода, оборудования для производства вторичной электроэнергии, стоимость инженерных систем (линии электропередачи, внутренних кабельных сетей, водородопроводов, теплотрассы, водоснабжения, канализации, ливневой системы). Земельные и строительные расходы включают в себя расходы на приобретение земли, строительство и монтаж пилотного проекта, капитальные вложения в инфраструктуру и т. п. Капитальные вложения в инженерные сети могут сильно различаться в зависимости от местоположения объекта.

Стоимость инженерно-технических изысканий и проектирования

Это необходимые вложения для разработки и подготовки всего проекта (разработка ОИ, разработка проектно-сметной документации).

Стоимость разрешительных документов и налогов – различные сборы и налоги могут быть обязательными для таких проектов.

Резерв на неожиданные расходы – важно иметь резервный фонд на случай неожиданных расходов и задержек в проекте. Операционные расходы включают оплату персонала, обслуживание оборудования, обновление и ремонт. Также необходимо учесть, что цены на солнечные панели и оборудование для водородного электролиза меняются со временем. Для точной оценки капитальных вложений следует обратиться к поставщикам оборудования и материалов, к специалистам в сфере солнечной энергетики и водородных технологий, а также учесть местные условия и требования.

Важно отметить, что для солнечных условий села Бори число часов использования установленной мощности будет значительно выше, и это повлияет на показатель объема производства (выработки) электроэнергии. В соответствии с методическими положениями по проведению обоснования эффективности реализации инвестиционных проектов, основным критерием для принятия решения о финансировании является сокращение затрат или увеличение выручки, что приводит к увеличению прибыли инвестора. Ниже приведем расчет капитальных затрат на реализацию проекта солнечно-водородной станции для села Бори с фотоэлектрической станцией мощностью 1,5 МВт (таблица 5). Поскольку инвестиции представляют долгосрочное вложение экономических ресурсов с целью создания и получения чистых выгод в будущем, для оценки инвестиций необходимо все требуемые вложения и отдачу по проектам оценить с учетом временной ценности денег, т. е. с учетом того обстоятельства, что сумма денег, находящаяся в распоряжении в настоящее время, обладает большей ценностью, чем такая же сумма в будущем.

Заклучение

В рассматриваемом пилотном проекте предполагается строительство фотоэлектрической солнечной станции (ФСС) мощностью 1,5 МВт в Ахалском велаяте в населенном пункте Гокдепинского этрапа. Реализация проекта позволяет обеспечить энергоснабжение данного населенного пункта или производство в течение года 36990 кг «зеленого» водорода. Избыточное производство электрической энергии ФСС используется для производства водорода (14422 кг), который рассматривается как сезонное аккумулирование электрической энергии. При оценке эффективности вариантов целесообразно использовать концепцию дисконтирования потока реальных денег. Срок окупаемости служит для определения степени рисков реализации проекта и ликвидности инвестиций по рассматриваемому варианту. Все названные расчеты рекомендуется провести на стадии разработки предварительного ТЭО и уточнить на стадии разработки обоснования инвестиций.

Таблица 5 – Капитальные затраты на реализацию проекта солнечно-водородной станции для села Бори

Наименование комплекса работ, услуг, оборудования		Евро
1	ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ	97 500
2	ОСНОВНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, в том числе:	1 696 700
	Солнечные панели (3600 шт.)	738000
	Инвертор (5 шт.)	77 700
	Стол с креплением (288 шт.)	216 000
	Оборудование АСУ ТП, связи и сигнализации	92 500
	Электролизер (мощность 1 МВт)	400 000
	Микро турбины (2 G генераторы, 115 кВт)	172 500
3	СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНЫЕ РАБОТЫ в т. ч.	524 700
	Подготовка территории строительства	10 700
	Фундаменты	56 000
	Сети электроснабжения	84 000
	Монтаж оборудования	374 000
4	ПУСКО-НАЛАДОЧНЫЕ РАБОТЫ	42 000
5	ВРЕМЕННЫЕ ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	18 000
7	СТРАХОВАНИЕ	15 000
8	НЕПРЕДВИДЕННЫЕ ЗАТРАТЫ	45 000
	ИТОГО:	2 438 900
	Установленная мощность, кВт	1 500
	Удельные капиталовложения, евро/кВт	1 626

Список цитированных источников

1. Türkmenistanyň wodorod energiýasy babatda halkara hyzmatdaşlygy ösdürmek boýunça 2022-2023-nji ýyllar üçin ÝOL KARTASY. Türkmenistanyň Prezidentiniň 2022-nji ýulyň 28-nji ýanwarynda çykaran 2581-nji Karary bilen tassyklanyldy.

2. Türkmenistanyň Prezidentiniň Karary bilen tassyklanan. Türkmenistanda 2030-njy ýyla çenli gaýtadan dikeldilýän energetikany ösdürmek boýunça Milli Strategiýa. Aşgabat, 2020ý. Türkmenistanyň Prezidentiniň 2020-nji ýulyň 04-nji dekabrynda çykaran 2007-nji Karary bilen tassyklandy.

3. Jumayev, A . Pilot project on «green» hydrogen generation at the territory of Turkmenistan // Journal of Physics: Conference series. 2723(2024)012010.

4. Алморген, С. Солнечно-водородная энергетическая система для Саудовской Аравии / С. Алморген, Т. Н. Везируглу // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 2018. – № 07-09. – С. 30–42.

5. Марченко, О. В. Анализ эффективности аккумулирования электрической энергии и водорода в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии / О. В. Марченко, С. В. Соломин // Вестник Иркутского гос. технич. ун-та. – 2018. – Т. 22. – № 3. – С.183–193. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-183-193.

References

1. «Türkmenistanyň wodorod energiýasy babatda halkara hyzmatdaşlygy ösdürmek boýunça 2022-2023-nji ýyllar üçin ÝOL KARTASY». Türkmenistanyň Prezidentiniň 2022-nji ýulyň 28-nji ýanwarynda çykaran 2581-nji Karary bilen tassyklanyldy. [Road map, on the development of the international cooperation in the field of the hydrogen energy for 2022-2023 years, was adopted by the decree of the President of Turkmenistan on January 28, 2022]. (In Turkmen)

2. Türkmenistanyň Prezidentiniň Karary bilen tassyklanan «Türkmenistanda 2030-njy ýyla çenli gaýtadan dikeldilýän energetikany ösdürmek boýunça Milli Strategiýa. Aşgabat, 2020ý. Türkmenistanyň Prezidentiniň 2020-nji ýulyň 04-nji dekabrynda çykaran 2007-nji Karary bilen tassyklandy [«National Strategy for the Development of Renewable Energy in Turkmenistan by 2030» approved by the Decree of the President of Turkmenistan. Ashgabat, 2020. Approved by the Resolution of the President of Turkmenistan dated December 4, 2020, 2007]. (In Turkmen)

3. Jumayev A . Pilot project on «green» hydrogen generation at the territory of Turkmenistan . Journal of Physics: Conference series. 2723(2024)012010.

4. Almorgen S., Veziroglu T.N. Soar-hydrogen energy system for Saudi Arabia // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. No.07-09. (255-257). 2018.

5. Marchenko O.V., Solomin S.V. Analysis of electric energy and hydrogen accumulation efficiency in power systems with renewable energy sources // Proceeding of ISTU Vol. 22, No. 3, 2018.

УДК 628.3

ОЧИСТКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ СВИНЦА ФИЛЬТРАМИ, ЗАГРУЖЕННЫМИ ИЗМЕЛЬЧЕННЫМ БРИКЕТИРОВАННЫМ ТОРФОМ

Б. Н. Житнев, к. т. н., доцент, профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: gitenev@tut.by

Д. Д. Сенчук, м. т. н., аспирант кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов, Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: senchuk.d.d@mail.ru

Реферат

Рассмотрены вопросы загрязнения пресных водоемов производственными сточными водами содержащих ионы свинца Pb^{+2} , на основании проведенных исследований установлено: эффективность сорбции снижается с увеличением крупности зерен брикетированного торфа; наиболее эффективно процесс сорбции ионов брикетированным торфом протекает в течение 5 минут контакта, затем он замедляется. В течение 5 минут удаляется до 98 % ионов Pb^{+2} , сорбционная емкость при насыщении составила по Pb^{+2} – 0,8205 мМоль/г (170,00 мг/г).