Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы

1997 жылдан бастап шығады

ВЕСТНИК Торайгыров университета

Энергетическая серия

Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО
о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж
выдано
Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность
публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

---

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/2710-3420

Бас редакторы – главный редактор
Талипов О. М.
доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора — Калтаев А.Г., *доктор PhD*
Ответственный секретарь — Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	*д.т.н., профессор*
Никифоров А. С.,	*д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н.,	*д.т.н., профессор*
Алиферов А. И.,	*д.т.н., профессор (Российская Федерация)*
Кошеков К. Т.,	*д.т.н., профессор*
Приходько Е. В.,	*к.т.н., профессор*
Кислов А. П.,	*к.т.н., доцент*
Нефтисов А. В.,	*доктор PhD*
Шерьязов С. К.	т.ғ.д., *профессор (Российская Федерация)*
Искакова З. С.	*технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 44.31; 68.85

https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/455-474

Д. Р. Омар[1], Р. А. Омаров[2], Е. С. Умбетов[3], С. Т. Демесова[4], *Н. И. Молдыбаева[5]

[1,2]ТОО «НПЦ «Агроинженерии», заведующий лаборатории: «Энергосбережения и зеленой энергетики», Республика Казахстан, г. Алматы;
[1,2]Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы;
[3]Казахский национальный женский педагогический университет, Республика Казахстан, г. Алматы;
[4,5]Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Республика Казахстан, г. Алматы.
[1]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7857-0316
[2]ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9961-7657
[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6645-3489
[4]ORCID: https://orcid.org/0009-0007-9224-6460
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5016-8800
*e-mail: moldybayeva78@mail.ru

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ АГРОСЕКТОРА КАЗАХСТАНА

Существенное снижение цен на солнечные панели в последние 15 лет, повышение характеристик и надежности систем накопления энергии (BESS) на фоне практически неизменной стоимости дизель-генераторной электроэнергии (0.20–0.21 $/кВт·ч), создали объективные предпосылки для практической реализации автономного энергообеспечения удалённых объектов Казахстана с использованием фотоэлектрических (PV+BESS)-станций. Целью работы является технико-экономическая оценка применения PV+BESS-систем в различных климатических зонах Казахстана и сравнение их с традиционными дизель-генераторными установками (ДГУ). Методикой исследований является: анализ литературных источников, расчёт годовой выработки (PV+BESS)-установок, определение требуемой установленной мощности PV-панелей и ёмкости аккумуляторных батарей (BESS), оценка себестоимости

электроэнергии по показателю удельной приведённой стоимости (LCOE). Исследования выполнены для периода 2010–2025 гг. с учётом региональных климатических условий (Юг, Центр, Север Казахстана), динамики цен на PV-панели и BESS. Установлено, что за искомый период стоимость PV-панелей снизилась на 89–95 %, что привело к резкому снижение себестоимости (PV+BESS)-электроэнергии до 0,09–0,12 $/кВт·ч в 2025 году. При этом, себестоимость ДГУ-электроэнергии осталась практически неизменной, на уровне 0,20–0,21 $/кВт·ч. Подтверждено, что после 2017 года (PV+BESS)-станции стали экономически более эффективными по сравнению с ДГУ во всех климатических регионах Казахстана. Установлено, что увеличение ёмкости BESS, с целью продления времени автономной работы (PV+BESS)-станции, приводит к существенному росту стоимости электроэнергии. Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения (PV+BESS)-станций для автономного электроснабжения сельскохозяйственных объектов, где дизель-генераторные установки используются в качестве аварийных резервных источников, это подчеркивает необходимость оптимизации как установленной мощности, так и продолжительности работы дизель-генераторов.

Ключевые слова: фотоэлектрическая станция; PV+BESS; аккумуляторы (BESS); гибридная система; удельная стоимость электроэнергии; коэффициент эффективности PV-панели.

Введение

Стратегия, принятая Республикой Казахстаном достижения углеродной нейтральности к 2060 г. для обеспечения устойчивого будущего и решения проблем, связанных с изменением климата, формирует долгосрочный спрос на чистые технологии производства электрической энергии [1; 2]. В условиях резко континентального климата Казахстана фотоэлектрические системы относятся к числу наиболее доступных и широко применимых технологий возобновляемой энергии (PV-станции), которые обладают достаточным потенциалом для удовлетворения энергетических потребностей.

Сельскохозяйственный сектор, который изначально базируется на солнечной энергии, также нуждается в расширении технологических возможностей и методов в различных целях. Например, широко используются тепловые свойства солнечной энергии для сушки продуктов питания, других сельскохозяйственных культур, что является её прямым использованием. Однако их практическое внедрение требует решения технико-экономической

задачи, касающейся выработки и удельной стоимости PV-энергии, сезонности и потенциала солнечной энергии, стоимости компонентов PV-станции [3].

В литературе оценка фотоэлектрических (ФЭ) систем традиционно основывается на двух ключевых показателях: годовой выработке энергии на 1 кВт установленной мощности ФЭ и коэффициенте производительности (PR). Последний отражает долю годовой энергии, вырабатываемой на выходе инвертора, относительно теоретически ожидаемой выработки энергии, с учетом фактических потерь системы [4; 5; 6; 7]. Для Казахстана годовая выработка энергии на 1 кВт установленной мощности ФЭ обычно принимается в диапазоне от 1200 до 1600 кВт·ч/кВт·год в зависимости от региона и ориентации модулей. В некоторых исследованиях приводятся значения годовой выработки в диапазоне 1298–1534 кВт·ч/кВт·год [4; 5]. Для адекватного моделирования выработки энергии ФЭ обычно вводится коэффициент эффективности 0,75–0,85 для учета локальных факторов, таких как снежный покров, накопление пыли и нагрев модулей [7; 8].

Дизель-генераторные установки (ДГУ), остаются основными источниками электроэнергии на многих удаленных объектах. В последние годы устойчивое снижение цен на PV-панели и аккумуляторные батареи существенно повлияло на повышение конкурентоспособности PV+BESS-систем по сравнению с ДГУ. Международные аналитические обзоры показывают, что стоимость производства солнечной энергии за последние годы значительно снизилась, что открывает путь для внедрения гибридных энергетических систем [9; 10]. В ряде исследований установлена зависимость экономических показателей PV+BESS от региона. Например, эффективность системы постепенно повышается от южного региона к центральному и северному, в то время как цены на фотоэлектрические модули и батареи продолжают снижаться [11; 12].

Как обзорные, так и прикладные исследования были сосредоточены на оптимизации гибридных конфигураций, таких как PV + BESS и PV + BESS + дизельные генераторы. Гибридные системы, сочетающие PV с ветровыми турбинами или микрогидроэнергетикой, также исследовались [7; 13–16]. Обзоры гибридных систем PV–ветровая энергетика и методов их оптимизации подчеркивают важность сочетания моделирования ресурсов (PVOUT, ветровой потенциал) со стохастической оптимизацией и технико-экономическим анализом (LCOE, NPV и чувствительность к цене топлива и стоимости батарей) [13; 14]. Для удаленных площадок обычно используются такие инструменты, как HOMER, PVsyst и специализированные сценарные модели. Несколько исследований также показывают, что стратегии управления, основанные на прогнозировании

нагрузки и погоды, могут увеличить долю возобновляемых источников энергии и снизить зависимость от резервных дизельных генераторов [15; 17].

Интеграция фотоэлектрических элементов с тепловыми насосами и фотоэлектрическими тепловыми (ФТ) коллекторами рассматривается как способ повышения общей полезной выработки энергии системы – обеспечения электроэнергии вместе с теплом или охлаждением – и улучшения ее экономической эффективности в агропромышленных приложениях, таких как обогрев теплиц, сушка урожая и холодильные установки в холодовой цепи [16, 18]. Однако обзоры указывают на недостаток длительных полевых испытаний и отсутствие единой методологии оценки производительности этих комбинированных систем в реальных условиях [18; 19].

В контексте Казахстана по-прежнему наблюдается нехватка полевых данных по фотоэлектрическим установкам и гибридным системам, работающим в континентальном климате с длинными снежными зимами; лишь ограниченное количество региональных исследований LCOE учитывает логистику и цены на дизельное топливо; а решения PV + микрогидроэнергетика для горных районов и гибриды PV + ветроэнергетика для ветреных регионов остаются недостаточно оцененными [2, 12, 13]. Исследования в области хранения энергии также показывают, что неограниченное расширение мощностей BESS экономически не оправдано, что делает необходимым оптимизацию размера батарей с учетом требуемой зимней автономности (8–12 ч) и стоимости жизненного цикла [10].

Исследования показывают, что проектированию автономных систем гибридных систем должна предшествовать оценка ресурсной базы планируемых ВИЭ (PV-потенциал, ветровой потенциал, гидроресурс) [2; 5].

Обязательной частью технико-экономического обоснования является анализ цен PV-модулей, коэффициент эффективности PV-панелей и стоимости топлива для типовых удалённых объектов (ферма, ветсан-посты, склады) [9; 13; 15].

Необходимым шагом для количественной оценки реального износа, анализа влияния снежного покрова и подтверждения коэффициента эффективности в континентальном климате является проведение пилотных проектов, включающих периоды мониторинга не менее двух-трех лет [5; 18].

В сельскохозяйственном секторе регионы с подтвержденными ветровыми и водными ресурсами могут отдавать приоритет гибридным конфигурациям, таким как фотоэлектрические системы + системы хранения энергии + дизельные генераторы и фотоэлектрические системы + системы хранения

энергии + теплоснабжение, а также фотоэлектрические системы + ветровые турбины и фотоэлектрические системы + микрогидроэнергетика [14; 16].

Анализ литературы показывает, что снижение цен на фотоэлектрические панели и системы хранения энергии превращает фотоэлектрические модули и гибридные конфигурации возобновляемой энергии в практичные решения для автономного электроснабжения удаленных объектов. В Казахстане приоритетной задачей является получение достоверных данных о потенциале возобновляемых ресурсов, выбранных для проектирования системы; эти данные составляют основу для построения региональной технико-экономической модели, учитывающей логистику и результаты пилотных проектов.

В связи с приведенным, актуальной задачей является анализ и оценка технико-экономической эффективности гибридной системы: PV+BESS в производственных процессах агросектора Казахстана.

Материалы и методы

Одним из основных показателей фотоэлектрического модуля является коэффициент производительности (PR), который количественно определяет долю годовой энергии, фактически вырабатываемой на выходе инвертора, относительно теоретически ожидаемой выработки и рассчитывается с использованием уравнения (6):

$$PR = \frac{E_{AC}/P_{PV}}{H_{SE}/G_{PV}} \quad (1)$$

где E_{AC} – годовая выработка энергии на выходе инвертора, кВт·ч; P_{PV} – установленная мощность фотоэлектрических панелей, кВт; H_{SE}– солнечная радиация в плоскости массива кВт·ч/м², G_{PV}=1 кВт/м².

Когда расчет PR оправдан, учитываются все реальные потери: изменения эффективности панели из-за температуры; потери при преобразовании постоянного тока в переменный в инверторе; эффективность MPPT-инвертора; естественное затенение, вызванное снегом, пылью, загрязнением, износом или простоями; и потери, связанные с подзарядкой батареи (BESS – Battery Energy Storage System).

Необходимая установленная мощность фотоэлектрических панелей рассчитывается по формуле:

$$P_{PV} = \frac{E_{\text{эл.баз}}}{Y_{spec} \cdot PR} \quad (2)$$

где: $E_{эл.баз}$ – годовая потребность объекта в электроэнергии; Y_{spec} – удельная выработка фотоэлектрической энергии кВт·ч/кВт установленной мощности солнечных панелей, в год.

Для Казахстана Y_{spec} обычно составляет 1200–1600 кВт·ч/кВт·год [4]. При расчете мощности для зимних условий используется уменьшенное значение Y_{spec}, принимаемое равным 35–55 % от среднегодового значения для наклона модуля на «широту + 15°».

Емкость аккумуляторов для фотоэлектрической системы определяется критическими нагрузками и необходимостью обеспечения 12 часов автономной работы в темное время суток. Поскольку батареи не должны разряжаться ниже 50–70 % от своей номинальной емкости, размер установленного аккумуляторного блока примерно на 70 % больше теоретического минимума.

Технико-экономическая оценка основана на общепринятом международном показателе приведенной стоимости электроэнергии ($LCOE_{el}$ – Levelized Cost of Electricity) определяется как общие затраты за весь срок службы проекта, деленные на суммарную выработку электроэнергии ($E_{del,t}$) системой PV + BESS за весь срок ее эксплуатации. В состав затрат входят первоначальные затраты на приобретение и установку, а также ежегодные эксплуатационные расходы и расходы на техническое обслуживание в последующие годы.

$$LCOE_{el} = \frac{I_0^{PV+BESS} + \sum_{t=1}^{N} C_{opt} - SV_N^{PV+BESS}}{\sum_{t=1}^{N} E_{del\,t}} \quad (3)$$

где $I_0^{PV+BESS}$ – обычно обозначаемое как первоначальные инвестиции – представляет собой единовременные капитальные затраты на приобретение комплекта PV + BESS вместе с его силовыми электронными компонентами.

$\sum_{t=1}^{N} C_{opt}$ (эксплуатационные расходы) – это сумма всех эксплуатационных расходов и расходов на замену компонентов, понесенных за весь срок службы проекта, составляющий N лет;

C_{opt} – это эксплуатационные расходы в конкретном году t;

$SV_N^{PV+BESS}$ представляет собой чистую экономию затрат на энергию, достигнутую за N-летний период;

и $\sum_{t=1}^{N} E_{del,t}$ – это общее количество полезной электроэнергии, выработанной системой за эти N лет.

Единовременные капитальные затраты рассчитываются как сумма затрат на приобретение PV-панелей (I_0^{PV}) и на приобретение аккумуляторов (I_0^{BESS}):

$$I_0^{PV+BESS} = I_0^{PV} + I_0^{BESS} \quad (4)$$

Годовые оперативные затраты рассчитываются, как сумма эксплуатационных ($C_o^{PV+BESS}$) и затрат на замену элементов ($C_{rep}^{PV+BESS}$):

$$C_{op}^{PV+BESS} = C_o^{PV+BESS} + C_{rep}^{PV+BESS} \quad (5)$$

Из (5) выводится формула для расчета дисконтированных оперативных затрат за расчетный период, N:

$$\sum_{t=1}^{N} C_{opt} = \sum_{t=1}^{N} \frac{C_{O\&M,t}^{PV+BESS} + C_{rep,t}^{PV+BESS}}{(1+r)^t} \quad (6)$$

где: r – ставка дисконтирования, используемая для приведения стоимости к соответствующему году эксплуатации, t.

Чистая приведённая экономия за расчётный период эксплуатации, получаемая за счёт внедрения системы PV+BESS по сравнению с базовым вариантом энергоснабжения рассчитывается по формуле:

$$SV_N^{PV+BESS} = \sum_{t=1}^{N} \frac{C_t^{base} - C_t^{PV+BESS}}{(1+r)^t} - I_0^{PV+BESS} \quad (7)$$

где: C_t^{base} – эксплуатационные затраты базового варианта, в соответствующий год, t;

$C_t^{PV+BESS}$ – эксплуатационные затраты нового варианта, в соответствующий год, t.

Результаты и обсуждение

На рынке Казахстана имеются различные типы PV-панелей. На рисунке 1 показан график изменения стоимости моно-, поликристаллических и тонкопленочных PV-панелей в исследуемый период, с 2010 по 2025 годы.

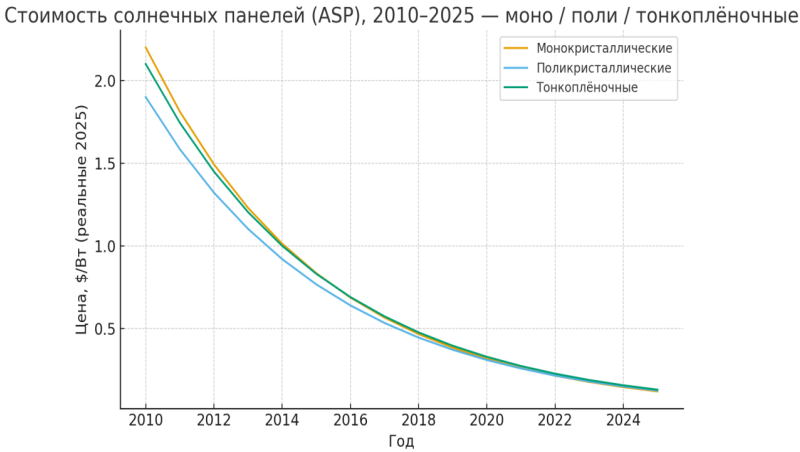


Рисунок 1 – График изменения стоимости PV-панелей в исследуемый период, с 2010 по 2025 годы

График свидетельствует, что за счёт масштабирования производства и технологического прогресса в исследуемый период (2010-2025 гг.) произошло резкое снижение стоимости PV-панелей на 89–95 %. Этому способствовало повышение спроса на фотоэлектрические панели, вызвавшее значительное расширение производственных мощностей и внедрение более современных технологических процессов. Анализ показывает резкое снижение стоимости: монокристаллические модули подешевели с 2,20 до 0,12 доллара за ватт, поликристаллические – с 1,90 до 0,125 доллара за ватт, а тонкопленочные модули – с 2,10 до 0,13 доллара за ватт. К 2025 году цены на все три технологии сблизились примерно до 0,12–0,13 доллара за ватт.

Однако монокристаллические панели производят больше энергии на той же площади поверхности. Их КПД составляет 20–23 %, тогда как поликристаллические модули достигают лишь 17–19 %. Следовательно, удельные затраты на монтажные конструкции, сваи, компоненты электрического баланса системы и установку примерно на 5–15 % ниже при использовании монокристаллической технологии. Монокристаллические модули также испытывают меньшие потери при высоких температурах, с температурным коэффициентом 0,30–0,35 % / °C по сравнению с 0,38–0,43 % / °C для поликристаллических элементов. В результате отрасль в значительной степени перешла на монокристаллические панели,

что повысило надежность и гарантийное обслуживание, а также упростило и снизило стоимость поставок, запасных частей и технической поддержки.

На рисунке 2 показана динамика удельной стоимости электроэнергии, вырабатываемой монокристаллическими фотоэлектрическими системами и дизельными генераторами, с 2010 по 2025 год в различных климатических зонах Казахстана. Стоимость электроэнергии варьируется от примерно 0,62 долл. США за кВт·ч в южных областях до около 0,71 долл. США за кВт · ч в центральной части страны и до 0,80 долл. США за кВт · ч в северных регионах.

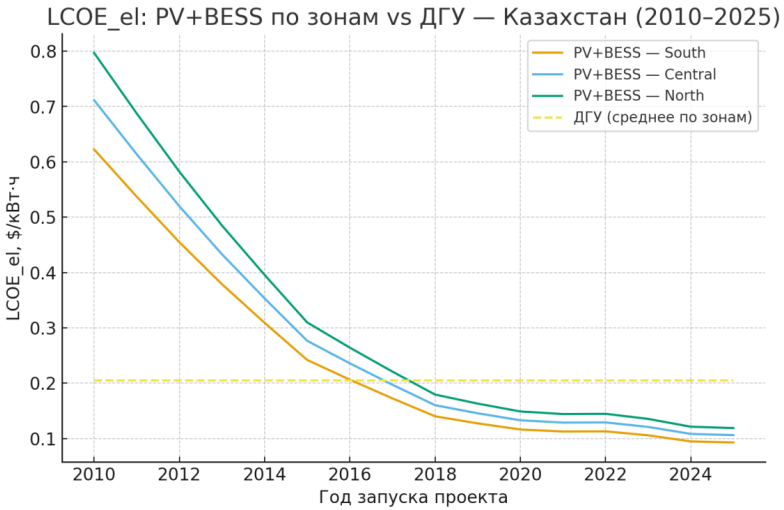


Рисунок 2 – Изменение удельной приведенной стоимости электроэнергии ($LCOE_{el}$) для монокристаллических фотоэлектрических панелей и дизель-генераторных установок в различных климатических зонах Казахстана с 2010 по 2025 год

Электроэнергия, вырабатываемая дизельными двигателями (желтая пунктирная линия), также оказалась дорогой: при цене дизельного топлива около 0,54 доллара за литр ее стоимость составила примерно 0,20-0,21 доллара за кВт · ч.

К 2025 году цена электроэнергии, вырабатываемой солнечными батареями с накопителями энергии (PV + BESS), резко снизилась – примерно до 0,09 доллара за кВт·ч на юге, 0,11 доллара в центре и 0,12 доллара на севере.

Стоимость электроэнергии, вырабатываемой дизельными двигателями, практически не изменилась, оставаясь на уровне 0,20-0,21 доллара за кВт · ч, поскольку 80-90 процентов их удельной стоимости электроэнергии (LCOE) обусловлено топливом, цены на которое росли в соответствии с рыночными ценами. В результате к 2025 году электроэнергия, вырабатываемая солнечными батареями с накопителями энергии, стала в 1,7-2,3 раза дешевле, чем электроэнергия, вырабатываемая дизельными двигателями.

Ценовое равенство наблюдалось в разное время в Казахстане: примерно в 2015-2016 годах на юге, в 2016-2017 годах в центре и в 2017–2018 годах на севере. В дальнейшем ожидается дальнейшее снижение стоимости систем PV + BESS, что еще больше увеличит разрыв с дизельной генерацией.

Основные причины снижения себестоимости PV+BESS-энергии, как было приведено выше: снижение стоимостей солнечных панелей, до 10–15 раз, снижение стоимости аккумуляторов и повышении их надёжности и соответствующее удешевление их замены, которая осуществляется через 12 лет эксплуатации.

На региональном уровне годовая выработка электроэнергии от солнечных электростанций и систем хранения энергии (PV + BESS) наиболее высока в южных провинциях Казахстана, что пропорционально снижает $LCOE_{el}$ по сравнению с центральной и северной зонами.

На рисунке 2 также показано, что после 2017 года использование дизельных генераторов нерентабельно, поскольку эксплуатационные расходы в основном состоят из затрат на топливо; техническое обслуживание и замена деталей составляют лишь небольшую долю и мало влияют на годовые затраты.

На рисунке 3 показаны графики зависимости себестоимости ($LCOE_{el}$) от емкости аккумуляторов BESS PV-станции мощностью 30 кВт.

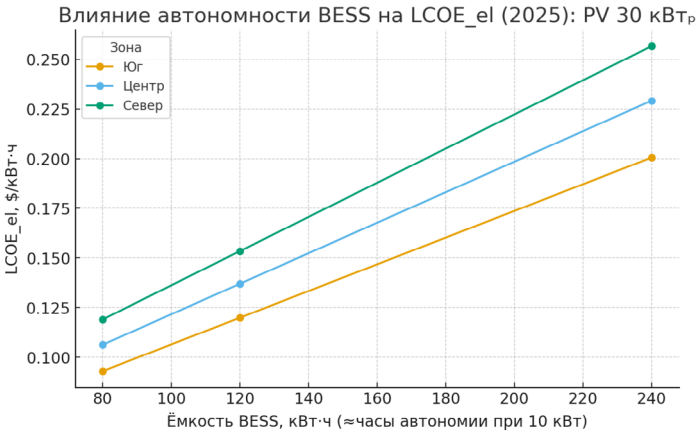


Рисунок 3 – График зависимости приведенной стоимости энергии ($LCOE_{el}$) от емкости BESS, на примере PV-станции мощностью 30 кВт

Как видно из графика, увеличение периода автономной работы PV+BESS-станции от 80 до 240 часов, приводит к пропорциональному росту стоимости электроэнергии, в 2 с лишним раза.

Информация о финансировании

Работа выполнена при финансовой поддержке грантового проекта: ГФ ИРН № AP26199873: «Разработка энерго- и ресурсосберегающей гибридной технологии транспортировки, хранения и складирования початков кукурузы с одновременной осциллирующей сушкой в контейнерах с использованием гелиовоздушных коллекторов и теплонасосной установки» [20].

Выводы

Снижение цен на фотоэлектрические модули и достижения в технологиях хранения энергии сделали гибридные системы возобновляемой энергии реалистичным вариантом для электроснабжения удаленных объектов в Казахстане. Приоритетной задачей является сбор данных о местных ресурсах солнечной, ветровой и малой гидроэнергетики; эти данные используются для построения региональной технико-экономической модели, управления логистикой и поддержки пилотных испытаний.

В южных регионах в качестве основного генератора может использоваться установка PV+BESS. Пользователям, требующим высокой надежности, по-прежнему необходим дизельный генератор для кратковременных пиковых нагрузок зимой.

В центральной зоне гибридная установка PV+BESS также может выступать в качестве основного источника, несмотря на сравнительно более высокую приведенную стоимость электроэнергии (LCOE), с резервным дизельным генератором, предназначенным для редких зимних отключений.

На севере, где инсоляция ниже, установка PV+BESS стала дешевле дизельного топлива в начале 2020-х годов, поэтому фотоэлектрическая батарея может обеспечивать базовую нагрузку, в то время как дизельный генератор остается лишь резервным.

В целом, пакет PV+BESS должен покрывать большую часть годового спроса на электроэнергию, при этом дизельный генератор будет работать как можно реже и как можно меньше. Поскольку значительная часть общих затрат приходится на приобретение и эксплуатацию системы хранения энергии, оптимизация емкости батарей имеет важное значение для обеспечения 8–12 часов автономной работы в зимнее время. Дальнейшего повышения эффективности и прибыли можно добиться за счет высококачественной установки, которая увеличивает коэффициент производительности фотоэлектрических модулей и замедляет их деградацию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 г. № 121. Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года. – [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121.

2 Указ Президента Республики Казахстан от 30 мая 2013 г. № 577. О концепции перехода Республики Казахстан к «зеленой экономике». – [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/U1300000577.

3 IRENA. Затраты на производство возобновляемой энергии в 2023 году. Абу-Даби : Международное агентство по возобновляемым источникам энергии, 2024, 96 с. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023.

4 Глобальный солнечный атлас. Казахстан: Данные о солнечных ресурсах. Вашингтон: Группа Всемирного банка, 2024. – [Электронный ресурс]. – URL: https://globalsolaratlas.info/download/kazakhstan.

5 **Андерсон, К. С., Хоббс, В. Б., Холмгрен, В. Ф.** Влияние коэффициента нагрузки инвертора на погрешность оценки энергии. – Голден, Колорадо: Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии (NREL), 2022. – 36 с. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/82812.pdf.

6 **Todorov, T., Stoyanov I.** Optimizing the Area of the Photovoltaic System taking into Account Shading and other Operational Conditions. (2024) CIEES 2024 – IEEE International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems, Cited 1 times. – https://doi.org/10.1109/CIEES62939.2024.10811269 – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85216584129&doi=10.1109%2fCIEES62939.2024.10811269&partnerID=40&md5=981c8f055fd9ab5ba9640199f933c494

7 PVsyst. Коэффициент производительности. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/performance_ratio.htm.

8 **Deline, C.** PV Lifetime Project - 2021 NREL Annual Report. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5K00-81172.– [Электронный ресурс]. – URL: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81172.pdf.

9 **Хассан, К., Алыгбури, С., Самин, А. З., Салман, Х. М., Яшчур, М.** Обзор гибридных систем возобновляемой энергии: решения на основе солнечной и ветровой энергии // Обзоры возобновляемой и устойчивой энергетики. – 2023. – Том 186. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302300748X.

10 **Назари, М. А., Гасеми, Х., Пурреза, Ф. и др.** Обновленный обзор интеграции солнечных фотоэлектрических систем и тепловых насосов // Обзоры возобновляемой и устойчивой энергетики. – 2023. – Том 167. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082622002496.

11 **Ван, В., Ли, Ю., Чжан, С.** Техникоэкономическая оценка гибридных систем PV–дизель–аккумулятор для птицеферм // Energy Reports. – 2025. – Том 15. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125000130.

12 **Ахмад, С., Бухари, С. С., Хан, А. А. и др.** Обзор гибридных возобновляемых и устойчивых энергетических систем : расчет размеров, оптимизация и управление // Energies. – 2024. – Том 17, № 23. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/23/6027.

13 Партнерство минисетей. Отчет о состоянии мирового рынка минисетей за 2024 год. – Лондон, 2024. – 132 с. – [Электронный ресурс]. – URL: https://minigrids.org/wp-content/uploads/2024/08/SOTM-Report-Launch_vF.pdf.

14 NASEO; NARUC. Микросеть чистой энергии: соображения для государственных энергетических управлений и комиссий по коммунальным услугам. – Вашингтон, округ Колумбия, 2023 г. – 78 с. – [Электронный

ресурс]. – URL: https://www.naseo.org/Data/Sites/1/documents/tk-news/clean-energy-microgrids_interactive.pdf.

15 IEA PVPS. Годовой отчет за 2021 год. – Париж: Международное энергетическое агентство, 2022 г. – 56 с. – [Электронный ресурс]. – URL: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/03/IEA-PVPS_Annual_Report_2021_v1.pdf.

16 **Ибрагим, М. Х., Акбар, М., Шукла Р.** Водородный солнечный насос в ночном орошени: устойчивые альтернативы дизелному топливу с использованием фотоэлектрических систем // Возобновляемая энергия. – 2024. – Том 219. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890424001602.

17 **Намдар, Х., Джалали, А., Мовахед, М. и др.** Фотоэлектрические тепловые системы с солнечными батареями : обзор // Энергетика и здания. – 2025. – Том 317. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778825002464.

18 **Гидрайтите, А., Слапшис, Р., Сабалюнас, Д.** Гибридные возобновляемые энергетические системы — обзор подходов к оптимизации и будущих задач // Прикладные науки. – 2025. – Том 15, № 4. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/4/1744.

19 **Halabi, Laith & Mekhilef, Saad & Olatomiwa, Lanre & Hazelton, James.** (2017). Performance analysis of hybrid PV/diesel/battery system using HOMER: A case study Sabah, Malaysia. Energy Conversion and Management. 144. 10.1016/j.enconman.2017.04.070. – [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/316515713_Performance_analysis_of_hybrid_PVdieselbatt

20 Национальный научный совет по приоритету «Устойчивое развитие агропромышленного комплекса». Протокол заседания № 4 (Астана, 15 июля 2025 г.) / Мин-во науки и высшего образования РК. – 2025. – 9 с.

REFERENCES

1 Ukaz Prezidenta Respubliki Kazahstan ot 2 fevralya 2023 g. № 121. Ob utverzhdenii Strategii dostizheniya uglerodnoj nejtralnosti Respubliki Kazahstan do 2060 goda. [Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated February 2, 2023 No. 121. On approval of the Strategy for achieving carbon neutrality of the Republic of Kazakhstan until 2060]. – [Electronic resource]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2300000121.

2 Ukaz Prezidenta Respubliki Kazahstan ot 30 maya 2013 g. № 577. O koncepcii perehoda Respubliki Kazahstan k «zelenoj ekonomike». [Decree of

the President of the Republic of Kazakhstan dated May 30, 2013 No. 577. On the concept of the transition of the Republic of Kazakhstan to a "green economy"]. – [Electronic resource]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/U1300000577.

3 IRENA. Zatraty na proizvodstvo vozobnovlyaemoj energii v 2023 godu. Abu-Dabi : [Renewable Energy Generation Costs in 2023. Abu Dhabi], Mezhdunarodnoe agentstvo po vozobnovlyaemym istochnikam energii, 2024, 96 s. [International Renewable Energy Agency, 2024, 96 p.] – [Electronic resource]. – URL: https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023.3

4 Globalnyj solnechnyj atlas. Kazahstan: Dannye o solnechnyh resursah. Vashington: Gruppa Vsemirnogo banka, 2024. [Global Solar Atlas. Kazakhstan: Solar Resource Data. Washington: World Bank Group, 2024.] – [Electronic resource]. – URL: https://globalsolaratlas.info/download/kazakhstan.

5 **Anderson, K. S., Hobbs, W. B., Holmgren, W. F.** Vliyanie koefficienta nagruzki invertora na pogreshnost ocenki energii. [Effect of Inverter Load Factor on Energy Estimation Error]. – Golden, CO : National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2022. – 36 p. – [Electronic resource]. – URL: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/82812.pdf.

6 **Todorov, T., Stoyanov I.** Optimizing the Area of the Photovoltaic System taking into Account Shading and other Operational Conditions. (2024) CIEES 2024 – IEEE International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems, Cited 1 times. – https://doi.org/10.1109/CIEES62939.2024.10811269 – [Electronic resource]. – URL: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85216584129&doi=10.1109%2fCIEES62939.2024.10811269&partnerID=40&md5=981c8f055fd9ab5ba9640199f933c494 pdf.

7 PVsyst. Koefficient proizvoditelnosti. [Performance Ratio]. – [Electronic resource]. – URL: https://www.pvsyst.com/help-pvsyst7/performance_ratio.htm.

8 **Deline, C.** PV Lifetime Project – 2021 NREL Annual Report. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5K00-81172.– [Electronic resource]. – URL: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81172.pdf.

9 **Hassan, K., Alghbouri, S., Samin, A. Z., Salman, H. M., Yashchur, M.** Obzor gibridnyh sistem vozobnovlyaemoj energii : resheniya na osnove solnechnoj i vetrovoj energii // Obzory vozobnovlyaemoj i ustojchivoj energetiki. [Review of Hybrid Renewable Energy Systems: Solar-Wind Solutions // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2023. – Vol. 186]. – [Electronic resource]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302300748X.

10 **Nazari, M. A., Ghasemi, H., Pourreza, F. et al.** Obnovlennyj obzor integracii solnechnyh fotoelektricheskih sistem i teplovyh nasosov // Obzory vozobnovlyaemoj i ustojchivoj energetiki. – 2023. – Tom 167. [An updated review

of the integration of solar photovoltaic systems and heat pumps // Reviews of Renewable and Sustainable Energy. – 2023. – Vol. 167]. – [Electronic resource]. - URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082622002496.

11 **Wang, W., Li, Y., Zhang, S.** Tehnikoekonomicheskaya ocenka gibridnyh sistem PV–dizel–akkumulyator dlya pticeferm [Techno-economic assessment of hybrid PV–diesel–battery systems for poultry farms]. // Energy Reports. – 2025. – Vol. 15. – [Electronic resource]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125000130.

12 **Ahmad, S., Bukhari, S. S., Khan, A. A., et al.** Obzor gibridnyh vozobnovlyaemyh i ustojchivyh energeticheskih sistem: raschet razmerov, optimizaciya i upravlenie [A review of hybrid renewable and sustainable energy systems: sizing, optimization, and control]. // Energies. – 2024. – Vol. 17, No. 23. – [Electronic resource]. – URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/23/6027.

13 Partnerstvo minisetej. Otchet o sostoyanii mirovogo rynka minisetej za 2024 god. – London, 2024. – 132 s. [Mini-grid Partnership. Global Mini-Grid Market Report 2024. London, 2024. 132 p. Available at] – [Electronic resource] – https://minigrids.org/wp-content/uploads/2024/08/SOTM-Report-Launch_vF.pdf.

14 NASEO; NARUC. Mikroset chistoj energii: soobrazheniya dlya gosudarstvennyh energeticheskih upravlenij i komissij po kommunalnym uslugam. – Vashington, okrug Kolumbiya, 2023 g. – 78 s. [Clean Energy Microgrids : Considerations for State Energy Offices and Public Service Commissions. Washington, DC, 2023, 78 p. Available at] – [Electronic resource] – https://www.naseo.org/Data/Sites/1/documents/tk-news/clean-energy-microgrids_interactive.pdf.

15 IEA PVPS. Godovoj otchet za 2021 god. – Parizh: Mezhdunarodnoe energeticheskoe agentstvo, 2022 g. – 56 s. [Annual Report 2021. Paris: International Energy Agency, 2022, 56 p]. – [Electronic resource] – Available at: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/03/IEA-PVPS_Annual_Report_2021_v1.pdf.

16 **Ibrahim, M. H., Akbar, M., Shukla, R.** Vodorodnyj solnechnyj nasos v nochnom orosheni: ustojchivye alternativy dizelnomu toplivu s ispolzovaniem fotoelektricheskih sistem [Hydrogen solar pump in night irrigation: sustainable alternatives to diesel fuel using photovoltaic systems]. // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 219. – [Electronic resource]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890424001602.

17 **Namdar, H., Jalali, A., Movahed, M., et al.** Fotoelektricheskie teplovye sistemy s solnechnymi batareyami: obzor [Photovoltaic Thermal Systems with Solar Panels]: A Review // Energy and Buildings. – 2025. – Vol. 317. – [Electronic resource]. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778825002464.

18 Gidraityte, A., Slapšys, R., Sabalunas, D. Gibridnye vozobnovlyaemye energeticheskie sistemy – obzor podhodov k optimizacii i budushih zadach // Prikladnye nauki. [Hybrid Renewable Energy Systems – A Review of Optimization Approaches and Future Challenges] // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 4. – [Electronic resource]. – URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/4/1744.

19 **Halabi, L. M., Mekhilef, S., Olatomiwa, L.** Analiz proizvoditelnosti gibridnoj sistemy PV–dizel–akkumulyator s ispolzovaniem HOMER : tematicheskoe issledovanie, Sabah, Malajziya [Performance Analysis of PV–Diesel–Battery Hybrid System Using HOMER].: A Case Study, Sabah, Malaysia // Energy Conversion and Management. – 2017. – Vol. 144. – [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/316515713_Performance_analysis_of_hybrid_PVdieselbatt

20 Nacional`ny`j nauchny`j sovet po prioritetu «Ustojchivoe razvitie agropromy`shlennogo kompleksa». Protokol zasedaniya № 4 (Astana, 15 iyulya 2025 g.) [National Scientific Council on the priority "Sustainable Development of the Agro-Industrial Complex". Minutes of Meeting No. 4 (Astana, July 15, 2025)] / Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan. – 2025. – 9 p.

Поступило в редакцию 29.04.26.
Поступило с исправлениями 20.05.26.
Принято в печать 03.09.26.

Д. Р. Омар[1], Р. А. Омаров[2], Е. С. Умбетов[3],
*С. Т. Демесова[4], *Н. И. Молдыбаева[5]*
[1,2]Агроинженерлік ғылыми-өндірістік орталығы, зертхана меңгерушісі:
Энергия үнемдеу және жасыл энергия,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[1,2]Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[3]Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;
[4,5]Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.
29.04.26 ж. баспаға түсті.
20.05.26 ж. түзетулерімен түсті.
03.09.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КӨМІРТЕКТІ БЕЙТАРАПТЫЛЫҚ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ ПРОЦЕСТЕРІН ЭНЕРГИЯМЕН ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУГЕ АРНАЛҒАН АВТОНОМДЫҚ КҮН ЖҮЙЕЛЕРІН БАҒАЛАУ

Азық-түлікке деген сұраныс ауыл шаруашылығында экологиялық таза энергияға деген сұранысты жылдам арттыруда. Сондықтан басқа аспектілермен бірге жаңа энергия көздерін іздеу ауылшаруашылық инженерия ғылымының орталығында тұр. Қазақстанның континенттік климатында аккумуляторды сақтау жүйесі (PV+BESS) бар фотоэлектрлік электр станцияларының болашағы зор. Дегенмен, олардың дизельдік генерациямен салыстырғанда бәсекеге қабілеттілігі сандық бағалауды қажет етеді.

Әдістері. Қазақстан бойынша әдебиеттерге шолу және ресурс деректері негізінде қысқы шығындар мен автономды жұмысты ескере отырып, PVOUT ≈ 1200–1600 кВт/сағ және өнімділік коэффициенті PR ≈ 0,75–0,85 нақты өндіру диапазоны қабылданды. Есептеулер үш климаттық аймақта (Оңтүстік, Орталық және Солтүстік) PV+BESS модульдері мен дизельдік генератор жинақтары (DGS) үшін $LCOE_{el}$ индикаторын пайдалану арқылы техникалық-экономикалық бағалаумен қатар, әдеттегі қашықтағы тұтынушылар үшін қажетті орнатылған PV панелінің сыйымдылығы мен BESS сыйымдылығының көрсеткіштері жасалды. Талдау PV панелі мен батарея құнының динамикасын, сондай-ақ автономияны (BESS сыйымдылығын) 80-ден 240 сағатқа дейін арттыру әсерін ескере отырып, 2010–2025 жылдар аралығын қамтиды.

Нәтижелер. 2010–2025 жылдарға арналған монокристалды PV панельдерінің құны шамамен 10-15 есеге (~0,12-0,13 $/Вт дейін) төмендегені көрсетілген, нәтижесінде PV+BESS $LCOE_{el}$ деңгейі оңтүстікте ~0,09 $/кВт/сағ, орталықта ~0,11 $, $/кВт/сағ, ал солтүстікте $2 және 2 кВт/сағ төмендеді. дизельдік генератордың электр энергиясының құны іс жүзінде өзгеріссіз қалды (~0,20-0,21 $/кВтсаг). PV+BESS дизельді генерациядан паритет пен кейінгі артықшылыққа ертерек Оңтүстікте (≈2015-2016), одан кейін Орталық және Солтүстік аймақтарда (≈2016-2018) қол жеткізілді. $LCOE_{el}$ маңызды үлесі BESS-ке тиесілі екені анықталды, ал қажетті автономияны арттыру жүйенің құнын айтарлықтай арттырады.

Талқылау және қорытындылар. Алынған нәтижелер көрсеткендей, PV+BESS модульдері 2025 жылға қарай Қазақстанның шалғай учаскелерінде автономды электрмен жабдықтау үшін экономикалық тиімді базалық қуат көзі болады, ал дизельдік генераторлар резервтік/шың көз ретінде қызмет етуді жалғастырады. Оңтайландырудың негізгі бағыттарына сәйкес BESS қуатын таңдау (қыс мезгілінде шамамен 8–12 сағат автономияны қамтамасыз ету), жоғары сапалы орнату және пайдалану арқылы PR-ды жақсарту және электр энергиясын, жылуды және салқындатуды біріктіріп өндіру үшін PV+BESS жылу сорғыларымен (PV+BESS+HP/PVT) біріктіру кіреді.

Кілтті сөздер: фотоэлектрлік жүйелер (PV); батарея энергиясын сақтау жүйелері (BESS); гибридті PV–BESS–дизельдік генераторлық қондырғылар (DGS) кешендері; ауыл шаруашылығы объектілерін автономды электрмен жабдықтау; электр энергиясының теңестірілген құны (LCOE); техникалық-экономикалық талдау (NPV, IRR); PV жүйелерінің өнімділік коэффициенті (PR); Қазақстанның климаттық жағдайы.

*D. Omar[1], R. Omarov[2], E. Umbetov[3], S. Demessova[4], *N. Moldybayeva[5]*
[1]Agroengineering Scientific and Production Center,
Laboratory Head: Energy Saving and Green Energy,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[2] G. Daukeyev Almaty University of Power
Engineering and Telecommunications,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[3]Kazakh National Women's Teacher Training University,
Republic of Kazakhstan, Almaty;
[4,5]Kazakh National Agrarian Research University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.
Received 29.04.26.
Received in revised form 20.05.26.
Accepted for publication 03.09.26

EVALUATION OF AUTONOMOUS SOLAR SYSTEMS FOR POWER SUPPLY OF AGRICULTURAL PROCESSES IN CONDITIONS OF CARBON NEUTRALITY

The demand for food is dynamically increasing the demand for environmentally and economically acceptable energy in agriculture.

Therefore, the search for new energy sources is at the center of agricultural engineering science, along with other aspects. In the continental climate of Kazakhstan, photovoltaic stations with storage systems (PV+BESS) are promising. However, their competitiveness compared to diesel generation requires quantitative assessment.

Methods. Based on a review of literature and resource data for Kazakhstan, the specific output range PVOUT ≈ 1200–1600 kWh/kW·year and performance coefficient PR ≈ 0.75–0.85 were adopted, taking into account winter losses and autonomous mode. Calculations of the required installed capacity of PV panels and BESS capacity for typical remote consumers, as well as a feasibility study based on the $LCOE_{el}$ indicator for PV+BESS modules and diesel generator sets (DGS) in three climate zones (South, Center, North) have been performed. The analysis covers the period from 2010 to 2025.

Results. It is shown that the cost of monocrystalline PV panels in 2010-2025 decreased by about 10-15 times (to ~ 0.12-0.13 $/Watt), which led to a decrease in $LCOE_{el}$ PV+BESS to ~ 0.09 $/kWh in the South, ~ 0.11 $/kWh in the Center and ~ 0.12 $/kWh in the North at an almost constant cost of DSU electricity (~ 0.20–0.21 $/kWh). Parity and subsequent superiority of PV+BESS over diesel generation were achieved earlier in the South (≈ 2015–2016), than in the Central and Northern regions (≈ 2016–2018). It has been established that a significant share of $LCOE_{el}$ is accounted for by BESS, and an increase in the required autonomy significantly increases the cost of the system.

Discussion and conclusions. The results obtained show that PV+BESS modules by 2025 become an economically preferable base source for autonomous power supply of remote facilities in Kazakhstan, while maintaining the DGS as a backup/peak source.

Keywords: photovoltaic systems (PV); energy storage systems (BESS); hybrid PV–BESS–DGU complexes; autonomous power supply for agricultural facilities; electricity cost (LCOE); technical and economic analysis (NPV, IRR); photovoltaic system performance coefficient (PR); climatic conditions in Kazakhstan.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
19,0 Mb RAM
Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.
Электронное издание
19,0 Mb RAM
Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.
Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас
Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
Торайғыров университеті
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
67-36-69
E-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik-energy.tou.edu.kz