

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Научная статья / Research Article

УДК 330.342.146

DOI: 10.36718/2500-1825-2025-3-3-19

Наталья Борисовна Михеева¹, Александр Валериевич Чебодаев²

^{1,2}Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

¹balabono8@mail.ru

²chebodaev@yandex.ru

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СЕТЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Цель исследования – снижение расходов на электрическую энергию сельскохозяйственных предприятий путем использования сетевых фотоэлектрических станций. Размер платы за электрическую энергию в расходах сельскохозяйственных предприятий может достигать 10 % и более, что негативно сказывается на стоимости сельскохозяйственной продукции и не способствует развитию производственной базы. В Доктрине энергетической безопасности Российской Федерации содержится требование обеспечения экономически эффективного сочетания использования систем централизованного электроснабжения с развитием распределенной генерации электрической энергии, в т. ч. возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В энергетической стратегии России на период до 2035 г. декларируется переход от ресурсно-сырьевого к ресурсно-инновационному развитию топливно-энергетического комплекса, а одной из целей стратегии является децентрализованная генерация. В качестве ВИЭ необходимо рассматривать солнечную энергетику как источник, имеющий всеобщее распространение. Совершенствование технологии способствует снижению стоимости производства электрической энергии, которая приближается к стоимости традиционных источников энергии. В результате проведения литературного обзора определены перспективные сетевые фотоэлектрические станции (ФЭС) российского производства от компаний «Хевел» и «Технолайн» мощностью от 15 до 80 кВт, способные обеспечить конкурентную стоимость электрической энергии для энергообеспечения сельскохозяйственных предприятий. В ходе проведенных расчетов по предложенной методике и моделирования работы ФЭС на территории Красноярского края, республиках Хакасия и Тыва в рамках закона о микрогенерации определено, что при тарифе на электрическую энергию в 8 руб. за 1 кВт·ч и при удельной стоимости оборудования сетевой ФЭС 45,6 тыс. руб./1 кВт срок окупаемости капиталовложений составляет от четырех до девяти лет. При увеличении тарифа на электрическую энергию срок окупаемости уменьшается. Применение сетевых ФЭС для энергообеспечения сельскохозяйственных предприятий эффективно в южных и центральных районах Красноярского края, республиках Хакасия и Тыва.

Ключевые слова: сетевая фотоэлектрическая станция, выработка электрической энергии, капиталовложения, срок окупаемости

Для цитирования: Михеева Н.Б., Чебодаев А.В. Технико-экономические аспекты применения сетевых фотоэлектрических станций для электроснабжения сельскохозяйственных предприятий // Социально-экономический и гуманитарный журнал. 2025. № 3. С. 3–19. DOI: 10.36718/2500-1825-2025-3-3-19.

Natalya Borisovna Mikheeva¹, Alexander Valerievich Chebodaev²

^{1,2}Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

¹balabono8@mail.ru

²chebodaev@yandex.ru

TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF GRID-TIED PHOTOVOLTAIC PLANTS USE FOR AGRICULTURAL ENTERPRISES POWER SUPPLY

The aim of the study is to reduce the costs of electric energy of agricultural enterprises by using grid-tied photovoltaic stations. The size of the payment for electric energy in the costs of agricultural enterprises can reach 10% or more, which negatively affects the cost of agricultural products and does not contribute to the development of the production base. The doctrine of energy security of the Russian Federation contains a requirement to ensure an economically efficient combination of the use of centralized power supply systems with the development of distributed generation of electric energy, including renewable energy sources (RES). The energy strategy of Russia for the period up to 2035 declares the transition from resource-raw materials to resource-innovative development of the fuel and energy complex, and one of the goals of the strategy is decentralized generation. Solar energy should be considered as a RES, as a source that is widely distributed. Improvement of technology helps to reduce the cost of electricity production, which is approaching the cost of traditional energy sources. As a result of the literature review, promising grid-tied photovoltaic power plants (PPP) of Russian production from Hevel and Technoline with a capacity of 15 to 80 kW were identified, capable of providing a competitive cost of electric energy for power supply to agricultural enterprises. In the course of calculations carried out according to the proposed methodology and modeling of the PPP operation in the Krasnoyarsk Region, the Republics of Khakassia and Tuva within the framework of the law on microgeneration, it was determined that with an electric energy tariff of 8 rubles per 1 kW·h and with a specific cost of grid-tied PPP equipment of 45.6 thousand rubles/1 kW, the payback period of capital investments is from four to nine years. With an increase in the tariff for electric energy, the payback period decreases. The use of grid-tied PPP for power supply to agricultural enterprises is effective in the southern and central regions of the Krasnoyarsk Region, the Republics of Khakassia and Tuva.

Keywords: grid-tied photovoltaic power plant, electric energy generation, capital investments, payback period

For citation: Mikheeva N.B., Chebodaev A.V. Technical and economic aspects of grid-tied photovoltaic plants use for agricultural enterprises power supply // Socio-economic and humanitarian journal. 2025. N 3. P. 3–19. DOI: 10.36718/2500-1825-2025-3-3-19.



Введение. Стоимость электрической энергии для различных слоев населения, промышленности и сельскохозяйственных объектов может сильно различаться, даже в пределах одной энергетической системы.

В сельскохозяйственном производстве Красноярского края стоимость электрической энергии может достигать 8 рублей за 1 кВт·ч [1]. Размер платы за электрическую энергию в рас-

ходах сельскохозяйственных предприятий может достигать 10 % и более, что негативно сказывается на стоимости сельскохозяйственной продукции и снижает ее конкурентоспособность.

Для снижения расходов на электрическую энергию следует применять не только организационные и технические мероприятия по рациональному ее использованию, но и использовать возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [2], что положительно скажется на стоимости конечной продукции сельскохозяйственного производства. В Доктрине энергетической безопасности Российской Федерации [3] содержится требование обеспечения экономически эффективно-го сочетания использования систем централизованного электроснабжения с развитием распределенной генерации электрической энергии, в т. ч. ВИЭ. В то же время в энергетической стратегии России на период до 2035 г. [4] декларируется переход от ресурсно-сырьевого к ресурсно-инновационному развитию топливно-энергетического комплекса, а одной из целей стратегии является децентрализованная генерация. Одним из направлений обеспечения энергетической безопасности России будет рационализация структуры топливно-энергетического баланса с увеличением нетопливных источников энергии в производстве первичных топливно-энергетических ресурсов, в т. ч. ВИЭ (ветер, солнце). Использование фотоэлектрических станций (ФЭС) отвечает этим требованиям стратегии, т. е. реализации инновационных проектов в области децентрализации генерации, устойчивого развития энергетики, снижения себестоимости производства электрической энергии, обеспечения социального эффекта и экологических преимуществ.

В качестве ВИЭ необходимо рассматривать солнечную энергетику как источник, имеющий всеобщее распространение. В последнее время солнечная энергетика развивается ускоренными темпами не только за рубежом, но и в Российской Федерации [5]. Стоимость производства электрической энергии с

использованием солнечных электростанций (СЭС) приближается к стоимости традиционных источников энергии, при этом СЭС имеют значительно меньшее разрушающее воздействие на экологию [6].

Производители фотоэлектрического модуля (ФЭМ) и силового оборудования для СЭС развивают три основных направления СЭС – автономные, гибридные и сетевые. В связи с тем, что большинство производителей сельскохозяйственной продукции уже присоединены к централизованной системе электроснабжения, для обеспечения конкурентоспособной стоимости электрической энергии следует рассматривать сетевые фотоэлектрические станции российского производства, в т. ч. для целей микрогенерации [7]. Применение сетевых фотоэлектрических станций для энергообеспечения сельскохозяйственных предприятий, определение их энергетической и экономической эффективности являются актуальной задачей.

Цель исследования – снижение расходов на электрическую энергию сельскохозяйственных предприятий путем использования сетевых фотоэлектрических станций.

Задачи: провести обзор сетевых фотоэлектрических станций, предлагаемых российским рынком; выполнить расчет выработки электрической энергии сетевой фотоэлектрической станцией; оценить эффективность применения сетевой фотоэлектрической станции и определить срок окупаемости для электроснабжения объектов сельскохозяйственных предприятий.

Объект и методы. Объекты исследования – сетевые фотоэлектрические станции для энергообеспечения сельскохозяйственных предприятий.

Предмет исследования – взаимосвязь параметров выработки электрической энергии сетевой фотоэлектрической станцией, стоимости сетевой фотоэлектрической станции и срока окупаемости для снижения стоимости электрической энергии при электроснабжении сельских предприятий.

Методы исследования: теоретический анализ и синтез, наблюдение, описание, сравнение, «мозговой штурм», фокус-группа, моделирование, расчеты.

Фотоэлектрические станции (ФЭС), предлагаемые российским рынком. Сетевую ФЭС можно подключить к сетям в рамках Закона о микрогенерации, этот закон введен в действие в марте 2021 г. и позволяет отдавать в сеть излишки электроэнергии, при этом отдаваемая мощность не должна превышать 15 кВт [7]. Мощности систем электроснабжения сельскохозяйственных предприятий, как правило, составляют десятки и даже сотни кВт; мощности сетевой ФЭС в 15 кВт, которую можно использовать для микрогенерации, недостаточно, поэтому следует рассматривать сетевые ФЭС большей мощности. При этом необходимо обеспечить загрузку сетевой ФЭС в период ее максимальной мощности согласно графику технологического процесса.

Чтобы удовлетворить требования микрогенерации, в комплект сетевой ФЭС включен делимитер, который снижает мощность генерации сетевой ФЭС, если по одной из фаз идет превышение отдачи энергии [8–10]. Порог можно настроить на любое значение – от 0 до 5 кВт на фазу.

В настоящее время в Российской Федерации имеются компании, занимающиеся производством и реализацией компонентов фотоэлектрических систем. К таким компаниям относятся:

- «Хевел» [8];
- «Технолайн» [9];
- «Ваш солнечный дом» [10].

В линейке сетевых ФЭС от «Хевел» имеются электростанции мощностью от 1 до 80 кВт, некоторые из них представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики сетевых фотоэлектрических станций компании «Хевел» [8]

ФЭС	Мощность, кВт	Состав комплекта	Стоимость комплекта, руб.
C5-DH (рис. 1)	15	48 ФЭМ Хевел HVL-320/НJT; 1 сетевой инвертор Deye SUN-15K-G03; 12 коннекторов MC4; 2×60 м солнечного кабеля	974 990
C7	25	80 ФЭМ Хевел HVL-320/НJT; 1 сетевой инвертор Goodwe GW25K-MT; 20 коннекторов MC4; 2×93 м солнечного кабеля	1 480 890
C9-DH	50	160 ФЭМ Хевел HVL-320/НJT; 1 сетевой инвертор Deye SUN-50K-G03; 40 коннекторов MC4; 2×200 м солнечного кабеля	3 425 690
C11	80	256 ФЭМ Хевел HVL-320/НJT; 1 сетевой инвертор Goodwe GW80K-MT; 64 коннекторов MC4; 2×250 м солнечного кабеля	4 547 690

В линейке сетевых ФЭС от «Технолайн» имеются электростанции мощностью от 15 до 60 кВт [9], некоторые из них представлены в таблице 2.



Рис. 1. Общий вид комплекта сетевой фотоэлектрической станции Хевел С5-DH мощностью 15 кВт

Таблица 2

Характеристики сетевых фотоэлектрических станций компании «Технолайн»

ФЭС	Мощность, кВт	Состав комплекта	Стоимость комплекта, руб.
«Офис-1» (Экономия)	15	56 ФЭМ SilaSolar 280; 1 сетевой инвертор SOFAR 20000KTLX-G3; 1 контроллер излишков ARPC; 2×30 м солнечного кабеля	740 443
«Офис-3» (Экономия)	30	114 ФЭМ SilaSolar 340; 1 сетевой инвертор SOFAR 30000KTLX-G3; 1 контроллер излишков ARPC; 2×60 м солнечного кабеля	1 760 757
«Предприятие-2» (Экономия)	50	110 ФЭМ SilaSolar 460; 1 сетевой инвертор SOFAR 50000KTLX-G3; 1 контроллер излишков ARPC; 2×250 м солнечного кабеля	2 278 108
«Предприятие-3» (Экономия)	60	180 ФЭМ SilaSolar 360; 1 сетевой инвертор SOFAR 60000TL; 1 контроллер излишков ARPC; 2×300 м солнечного кабеля	3 152 722



Рис. 2. Структурная схема сетевой фотоэлектрической станции от компании «Технолайн» [6]

Типовой состав оборудования сетевой ФЭС. Все сетевые ФЭС строятся на одном принципе, как правило, состоят из однотипного набора оборудования, которое включает [8–11]:

- сетевой инвертор;
- контроллер излишков (делимитер);
- фотоэлектрические модули;
- двунаправленный счетчик электрической энергии;
- солнечный кабель;
- коннекторы;
- крепежная арматура.

Назначение оборудования. Сетевой инвертор – основное оборудование сетевой ФЭС, предназначен для преобразования электрической энергии постоянного напряжения и тока, вырабатываемых фотоэлектрическими модулями (ФЭМ) в переменное трехфазное напряжение и ток в соответствии с параметрами сети и передачи ее потребителю электрической энергии и излишков в сеть. Это современный и высокоэффективный трехфазный фотоэлектрический сетевой инвертор с МРРТ контроллером (или несколькими МРРТ контроллерами). Ин-

верторы, как правило, имеют встроенную функцию – возможность снижения мощности по команде делимитера (устройства, отслеживающего передачу электроэнергии в сеть). Датчики делимитера устанавливаются перед счетчиком, если определяется отдача электроэнергии в сеть, делимитер дает команду инвертору снизить вырабатываемую мощность, тем самым предотвращается отдача электроэнергии в сеть (очень часто российские счетчики считают отданную электроэнергию как потребленную). Сетевой инвертор используется только совместно с городской сетью, принцип его работы заключается в подмешивании (добавлении) энергии, вырабатываемой солнечными батареями, в сеть для обеспечения дополнительной нагрузки или экономии.

Контроллер излишков – создан для того, чтобы максимально использовать энергию от солнечных батарей или других возобновляемых источников энергии и ограничивать передачу электроэнергии от ФЭМ в сеть на определенном, заданном пользователем уровне [10].

Фотоэлектрические модули – это комбинация электрически соединенных

между собой фотоэлементов. Фотоэлектрический элемент (фотоэлемент) используется для получения электроэнергии за счет преобразования солнечного излучения [10].

Двухнаправленный электросчетчик – это устройство, которое измеряет поток электричества в двух направлениях – потребляемого нагрузкой и переданного в энергосистему.

Солнечный кабель – это соединительный кабель, используемый для фотоэлектрической генерации. Такие кабели соединяют солнечные батареи и другие электрические компоненты ФЭС [11], способны выдерживать напряжение до 1500 В и имеют внешний защитный слой из сшитого полиэтилена для защиты от разрушающего воздействия солнечного излучения.

Коннекторы – это стандартизированный разъем, применяемый для подключения солнечных батарей и массивов панелей. Коннектор создает надежное, герметичное электрическое соединение, подходящее для эксплуатации в уличных

условиях [9]. В основном применяются солнечные коннекторы типа MC-4.

Крепежная арматура – служит для крепления ФЭМ на крышах и фасадах зданий, на земле и т. д. В основном это набор специальных профилей и зажимов, выполненных из анодированного алюминия и нержавеющей стали, устойчивых к негативным воздействиям окружающей среды.

Методика расчета технико-экономических показателей. Основным показателем, по которому можно судить об эффективности работы сетевой ФЭС, является выработка электрической энергии [12]. Для определения выработки электрической энергии необходимо знать номинальную мощность одного ФЭМ используемых для создания массива солнечных панелей, количество ФЭМ, схему подключения, факторы, влияющие на снижение мощности сетевой ФЭС, а также среднегодовое (среднемесячное) количество пиковых солнечных часов в месте использования СФЭС [13].

Мощность, генерируемую ФЭС, P , Вт, рассчитываем по формуле

$$P = (I_{ед.ФЭМ} \cdot n_{пар.ФЭМ}) \cdot (U_{ном} \cdot n_{пос.ФЭМ}), \quad (1)$$

где P – мощность, генерируемая ФЭС, Вт; $I_{ед.ФЭМ}$ – пиковое значение тока единичного модуля, А; $n_{пар.ФЭМ}$ – число модулей, соединенных параллельно, шт.; $U_{ном}$ – номинальное напряжение модуля, В;

$n_{пос.ФЭМ}$ – количество модулей, соединенных последовательно, шт.

Количество произведенной электроэнергии одним модулем за сутки определяется по формуле

$$W_{мод.сут.} = K_p \cdot T_{сол.сут.} \cdot P_{пик.}, \quad (2)$$

где $W_{мод.сут.}$ – выработка электроэнергии одним модулем за сутки, Вт; K_p – коэффициент использования пиковой мощности фотоэлектрического модуля для солнечной электростанции, присоединенной к энергосистеме, значения K_p берутся в диапазоне 0,7–0,9, для автономной электростанции $K_p = 0,5–0,7$ о.е. [10, 12]; $T_{сол.сут.}$ – количество пиковых

солнце-часов, ч · сут; $P_{пик.}$ – пиковая мощность единичного модуля, Вт.

Коэффициент использования пиковой мощности фотоэлектрического модуля позволяет учесть снижение мощности ФЭМ, работающего в реальных условиях. На это будет влиять реальная пиковая облученность, в лабораторных условиях ФЭМ испытывают при интенсивности солнечной радиации 1000

Вт/м², а в реальных условиях интенсивность солнечной радиации составляет 800 Вт/м². Также на мощность влияют такие факторы, как загрязнение ФЭМ в процессе эксплуатации, затенение посторонними предметами, а также соседними ФЭМ, в зимний период снег может значительно ограничить мощность всей си-

стемы, если его своевременно не убрать, потери мощности существуют в инверторе, соединительных проводах и контактах и др.

Количество пиковых солнце-часов определяется по формуле

$$T_{сол.сут.} = \frac{t_{ср. j}}{n_j} \cdot K_{н.СС}, \quad (3)$$

где $T_{сол.сут.}$ – количество пиковых солнце-часов, ч·сут [13]; $t_{ср. j}$ – среднегодовая продолжительность солнечного сияния в j-м месяце, ч·мес.; n_j – количество дней в j-м месяце, шт.; $K_{н.СС}$ – коэффициент,

учитывающий неравномерность солнечного сияния, усл. ед.

Количество произведенной за j-й месяц фотоэлектрической установкой электроэнергии W_j , кВт·ч, рассчитываем по уравнению

$$W_j = W_{модсут.} \cdot n_j \cdot n_{ФЭМ}, \quad (4)$$

где W_j – выработка электроэнергии ФЭУ за j-й месяц, Вт; $W_{модсут.}$ – выработка электроэнергии одним модулем за сутки, Вт; n_j – количество дней в j-м ме-

сяце, шт.; $n_{ФЭМ}$ – общее количество модулей, шт.

Годовая выработка электрической энергии СФЭС определяется по формуле

$$W_{год} = \sum_{j=1}^{12} W_j. \quad (5)$$

Данная методика не учитывает температурный коэффициент номинальной мощности k_t (%/°C), который показывает снижение мощности ФЭМ в зависимости от его нагрева свыше номинальной температуры. Значения данного коэффициента указаны в паспортных данных на ФЭМ. В зависимости от типа ФЭМ этот коэффициент может значительно различаться. Обычные монокристаллические ФЭМ имеют k_t от -0,32 до -0,4 %/°C [9–11]; поликристаллические – от -0,35 до

-0,42 [9–11]; тонкопленочные – от -0,30 до -0,35 [10, 11]; гетероструктурные – от -0,27 до -0,32 %/°C [8].

Предлагается учитывать данный температурный коэффициент при расчете месячной выработки электрической энергии ФЭС в зависимости от среднемесячной многолетней температуры в месте установки ФЭС, с учетом того, что в процессе работы ФЭМ нагревается на 40–45 °C над температурой окружающей среды по формуле

$$W_j^t = W_j \cdot \eta_{tj}, \quad (6)$$

где W_j^t – месячная выработка ФЭС с учетом температурного КПД ФЭМ, кВт·ч; η_{tj} – температурный КПД ФЭМ для расчетного месяца, о.е.

$$\eta_{ti} = \frac{k_t \cdot (t_{OCj} + \Delta t - t_n)}{100}, \quad (7)$$

где k_t – температурный коэффициент номинальной мощности, %/°С; t_{OCj} – среднемноголетняя температура окружающего воздуха j -го месяца, °С [13]; Δt – превышение температуры ФЭМ над температурой окружающей среды, °С. Для расчета примем $\Delta t = 45$ °С; t_n – номинальная температура ФЭМ, °С. Принимается $t_n = 25$ °С.

Для анализа эффективности применения сетевых ФЭС различных мощностей и производителей необходимо провести расчет капитальных вложений

и себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии для каждого варианта сетевой ФЭС в зависимости от количества вырабатываемой электрической энергии.

Экономическое обоснование выполняется на примере сетевых ФЭС различной мощности для центральных и южных районов Красноярского края, республик Хакасия и Тыва.

Капиталовложения в рассматриваемый вариант определяются по формуле [14]

$$K = K_y + K_d + K_M + K_{ПН} + K_3 + K_{II} + K_{ПП}, \quad (8)$$

где K – капиталовложения в рассматриваемый вариант, руб.; K_y – цена установки, руб.; K_d – стоимость доставки, руб.; K_M – затраты на монтаж, руб.; $K_{ПН}$ – затраты на пусконаладочные работы, руб.;

K_3 – стоимость заземления, руб.; K_{II} – стоимость помещения, руб.; $K_{ПП}$ – прочие единовременные затраты, руб.

Для СФЭС цена установки определяется по уравнению [14]:

$$K_y = \sum_{i=1}^n K_i \cdot n_i, \quad (9)$$

где K_y – цена установки, руб.; K_i – стоимость i -го оборудования, руб.; n_i – количество i -го оборудования, шт.

Также стоимость СФЭС можно взять уже готовой с сайта компании, реализующей данное оборудование.

Стоимость доставки в какой-либо регион зависит от способа транспортировки (железнодорожный, авиационный или речной транспорт), расстояния от места производства до места назначения и веса груза [14]:

$$K_d = L \cdot k_p \cdot m, \quad (10)$$

где K_d – стоимость доставки, руб.; L – расстояние от места приобретения до места монтажа и дальнейшей эксплуатации, км; k_p – транспортная стоимость провоза 1 кг груза на 1 км, коп/(кг·км); m – масса груза, кг.

Затраты на монтаж и пусконаладочные работы определяются по локальной смете на данный вид работ. Принимаем $K_M = 4\%$, а $K_{ПН} = 2\%$ от K_y .

Стоимость заземления будет зависеть также от качества грунта, что ска-

жется на размерах горизонтальных и вертикальных заземлителей. Принимаем $K_3 = 1\%$ от K_v , если параметры заземляющего устройства (ЗУ) неизвестны, или учтем стоимость ЗУ в локальной смете.

Прочие единовременные затраты могут быть приняты в размере 5 % от вышеприведенных и будут включать в себя заранее непредвиденные расходы, которые могут возникнуть в ходе вышеперечисленных мероприятий.

$$I_{\text{ЭКС}} = I_{\text{АМ}} + I_{\text{ТР}} + I_{\text{ПР}} + I_{\text{ГСМ}}, \quad (11)$$

где $I_{\text{ЭКС}}$ – годовые эксплуатационные расходы, руб/год; $I_{\text{АМ}}$ – амортизационные отчисления, руб/год; $I_{\text{ТР}}$ – отчисления на текущий ремонт, руб/год; $I_{\text{ОТ}}$ – издержки на оплату труда обслуживающего персонала, руб/год; $I_{\text{ПР}}$ – прочие отчисления, можно принять равными

$$I_{\text{АМ}} = K \cdot \alpha_{\text{АМ}}, \quad (12)$$

где $I_{\text{АМ}}$ – амортизационные отчисления, руб/год; K – капиталовложения в рас-

стоимость помещения учитывать не будем, так как основное оборудование монтируется на открытом воздухе, в помещении устанавливаются инвертор, автоматические выключатели и предохранители.

К годовым эксплуатационным издержкам относятся все расходы, связанные с эксплуатацией оборудования.

Годовые эксплуатационные расходы определяются по уравнению [14]:

5 % от вышеперечисленных статей затрат, руб/год.

Амортизационные отчисления учитывают возмещение основных производственных фондов в процессе износа оборудования и определяются по уравнению [14]:

смаатриваемую ФЭС, руб; $\alpha_{\text{АМ}}$ – норма амортизационных отчислений.

Затраты на текущий ремонт определяются по уравнению [14]

$$I_{\text{ТР}} = K \cdot \kappa_{\text{ТР}}, \quad (13)$$

где $I_{\text{ТР}}$ – затраты на текущий ремонт, руб/год; K – капиталовложения в рассматриваемый вариант, руб.; $\kappa_{\text{ТР}}$ – норма отчислений на текущий ремонт, которую можно принять в размере 30–50 % от $\alpha_{\text{АМ}}$. Принимаем $\kappa_{\text{ТР}} = 50\%$ от $\alpha_{\text{АМ}}$.

Себестоимость электрической энергии в основном будет зависеть от первоначальной стоимости установки и коли-

чества выработанной в течение рассматриваемого периода электроэнергии, на которую влияют продолжительность солнечного сияния, способы ориентации на солнце и другие показатели.

Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии в расчете на срок службы СФЭС определяется по [14]:

$$C = \frac{I_{\text{ЭКС}}}{W_{\text{ГОД}}}, \quad (14)$$

где C – себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб/(кВт·ч); $I_{\text{ЭКС}}$ – годовые эксплуатационные расходы, руб/год;

$W_{\text{ГОД}}$ – годовая выработка электроэнергии, кВтч.

Для оценки эффективности использования СФЭС необходимо определить срок окупаемости капитальных вложений [14]:

$$T_{OK} = \frac{K}{\Delta_{\text{ЭЭ}}}, \quad (15)$$

где $\Delta_{\text{ЭЭ}}$ – экономия на оплату электрической энергии, тыс, руб. [14].

$$\Delta_{\text{ЭЭ}} = \frac{W_{\text{год}} \cdot C_{\text{ЭЭ}}}{1000} - I_{\text{ЭКС}}, \quad (16)$$

где $C_{\text{ЭЭ}}$ – стоимость электрической энергии, руб/(кВт·ч).

Результаты и их обсуждение.

На территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва имеются сельскохозяйственные предприятия различной направленности, мощности которых могут сильно отличаться. Наибольшее количество таких предприятий располагается в центральных и южных районах Красноярского края, республиках Хакасия и Тыва. На территории северной части Красноярского края распространены лесозаготовительные и промысловые предприятия, а также добывающая промышленность. Для исследования рассматривались наиболее перспективные, для применения ФЭС центральные и южные районы Красноярского края, республик Хакасия и Тыва.

В отличие от промышленности сельскохозяйственные предприятия характеризуются значительно меньшими нагрузками и рассредоточением объектов по большей площади. Мощности отдельных объектов могут достигать нескольких сотен кВт, но, как правило, большая часть объектов имеет мощности в несколько десятков кВт.

В качестве объектов микрогенерации может выступать возобновляемый источник электрической энергии мощностью не более 150 кВт, при этом отдача электрической энергии в сеть должна быть не более 15 кВт [7], остальная электрическая энергия должна потреб-

ляться собственными электроприемниками предприятия.

Для эффективной работы сетевой ФЭС, необходимо учитывать следующие условия при выборе ее мощности для электроснабжения сельскохозяйственного предприятия:

- мощность сетевой ФЭС не должна превышать минимальную мощность потребителя, согласно суточному графику нагрузок, более чем на 15 кВт. В противном случае делимитер будет ограничивать мощность выработки электрической энергии сетевой ФЭС на уровне отдачи в сеть не более 15 кВт, следовательно, часть электрической энергии может быть не произведена ФЭС, что снизит эффективность ее работы и увеличит срок окупаемости;

- сельскохозяйственному предприятию необходимо скорректировать суточный график нагрузок и по возможности стараться максимально загружать сетевую ФЭС собственными электроприемниками;

- для целей микрогенерации к общей сети потребительского напряжения (380/220 В) должны быть подключены прочие потребители электрической энергии, помимо электроприемников предприятия. В противном случае, никому будет потреблять излишки произведенной электрической энергии сетевой ФЭС, и всю вырабатываемую электрическую энергию необходимо будет потребить на собственных объектах пред-

приятия или она просто не будет произведена. Следовательно, в данном случае не имеет смысла завышать мощность сетевой ФЭС.

В связи с перечисленными выше требованиями, предъявляемыми к сетевой ФЭС, были исследованы сетевые ФЭС с минимальной мощностью 15 кВт и близкой к максимальной мощности 50 кВт. Сетевые ФЭС в таком диапазоне мощностей могут показать наилучшую эффективность работы при электрообеспечении объектов сельскохозяйственных предприятий. Кроме того, предприятия могут дискретно увеличивать мощность ФЭС за счет присоединения сетевых ФЭС к сетям, получающим питание от различных трансформаторных подстанций.

Эффективность сетевой ФЭС напрямую зависит от продолжительности солнечного сияния в рассматриваемом районе, которая зависит от географической широты. Следовательно, эффективность применения ФЭС возрастает от северных районов Красноярского края к Республике Тыва, по некоторым метеорологическим станциям наблюдается снижение продолжительности солнечного сияния за счет местных погодных явлений и рельефа местности.

Промоделировав работу сетевых ФЭС мощностью 50 кВт от компаний «Хевел» и «Технолайн» по районам Красноярского края, республикам Хакасия и Тыва при стоимости электрической энергии 8 руб. за 1 кВт·ч, определили, что срок окупаемости прямо пропорционален капиталовложениям и обратно пропорционален выработке электрической энергии сетевой ФЭС в рассматриваемом районе. Выработка электрической энергии прямо пропорциональна количеству пиковых солнце-часов, следовательно, зависит от района применения сетевой ФЭС. Минимальный срок окупаемости сетевой ФЭС от компании

«Хевел» мощностью 50 кВт и стоимостью 3 млн 425 тыс. руб., наблюдается в Республике Тыва, в окрестностях населенного пункта Эрзин, и составляет 6,8 лет. При этом в год можно экономить 503 тыс. руб., которые можно использовать на возмещение стоимости сетевой ФЭС. По истечении срока окупаемости, в течение оставшегося срока службы сетевой ФЭС (18,2 года), можно сэкономить 9 млн 150 тыс. руб.

Максимальный срок окупаемости из рассмотренных метеостанций наблюдается в селе Казачинское Красноярского края и составляет 17,7 лет. При этом в год можно экономить 194 тыс. руб., которые можно использовать на возмещение стоимости сетевой ФЭС. По истечению срока окупаемости, в течение оставшегося срока службы сетевой ФЭС (7,3 года), можно сэкономить 1 млн 417 тыс. руб.

Промоделировав работу сетевой ФЭС мощностью 50 кВт компании «Технолайн», стоимостью 2 млн 278 тыс. руб., по аналогичным районам, при стоимости электрической энергии 8 руб. за 1 кВт·ч, определили, что срок окупаемости сокращается за счет снижения капиталовложений, при этом увеличивается экономия затрат на электрическую энергию за счет снижения эксплуатационных расходов, следовательно повышается экономическая эффективность применения сетевых ФЭС.

При тарифе на электрическую энергию в 8 руб. за 1 кВт·ч и при невысокой относительной стоимости оборудования сетевой ФЭС первоначальные капиталовложения даже при малой продолжительности солнечного сияния (Казачинское) окупаются дважды за срок службы сетевой ФЭС, а в районах с большей продолжительностью солнечного сияния первоначальные капиталовложения окупаются до пяти раз (Эрзин) (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3

Результаты моделирования сетевой ФЭС мощностью 50 кВт компании «Технолайн» по районам Красноярского края, республикам Хакасия и Тыва при стоимости электрической энергии 8 руб. за 1 кВт·ч

Номер МС	МС (метеостанция)	Продолжительность солнечного сияния $E_{сол}, ч$	Годовая выработка электроэнергии $W_{год}, кВт·ч$	Срок окупаемости $T_{ок}, лет$	Срок получения прибыли $T_{приб}, лет$	Экономия затрат на электроэнергию за год $Э_{ээ}, тыс. руб.$	Экономия затрат на электроэнергию за срок службы $Э_{ээ-сс}, тыс. руб.$
26	Енисенск	1816	64927,51	7,6	17,4	298,51	5184,71
32	Казачинское оп. Поле	1703	60809,57	8,6	16,4	265,57	4361,12
43	Ачинск, ж.-д. ст.	1888	67243,04	7,2	17,8	317,04	5647,81
46	Солянка	2044	72814,97	6,3	18,7	361,61	6762,20
52	Красноярск	1833	65079,32	7,6	17,4	299,73	5215,07
68	Нижне-Усинское	2156	79123,93	5,5	19,5	412,08	8023,99
70	Ненастная	1898	68112,94	7,0	18,0	324,00	5821,79
73	Хакасская	2016	71875,09	6,4	18,6	354,09	6574,22
81	Кызыл	2409	87227,83	4,8	20,2	476,92	9644,77
83	Эрзин	2701	99021,70	4,0	21,0	571,27	12003,54

Эффективность работы сетевой ФЭС зависит от продолжительности солнечного сияния и величины капитальных вложений в сетевую ФЭС. При равных технических характеристиках экономическая эффективность выше у той сете-

вой ФЭС, чья стоимость ниже. Для сравнения необходимо определить удельную стоимость 1 кВт установленной мощности для рассматриваемых сетевых ФЭС (табл. 4).

Таблица 4

Определение удельной стоимости рассматриваемых сетевых ФЭС

Сетевая ФЭС	Мощность, кВт	Стоимость, руб.	Удельная стоимость 1 кВт ФЭС, руб.
Компании «Хевел»			
С5-DH	15	974 990	64999,3
С7	25	1 480 890	59235,6
С9-DH	50	3 425 690	68513,8
С11	80	4 547 690	56846,1
Компании «Технолайн»			
«Офис-1»	15	740 443	49362,9
«Офис-3»	30	1 760 757	58691,9
«Предприятие-2»	50	2 278 108	45562,2
«Предприятие-3»	60	3 152 722	52545,4

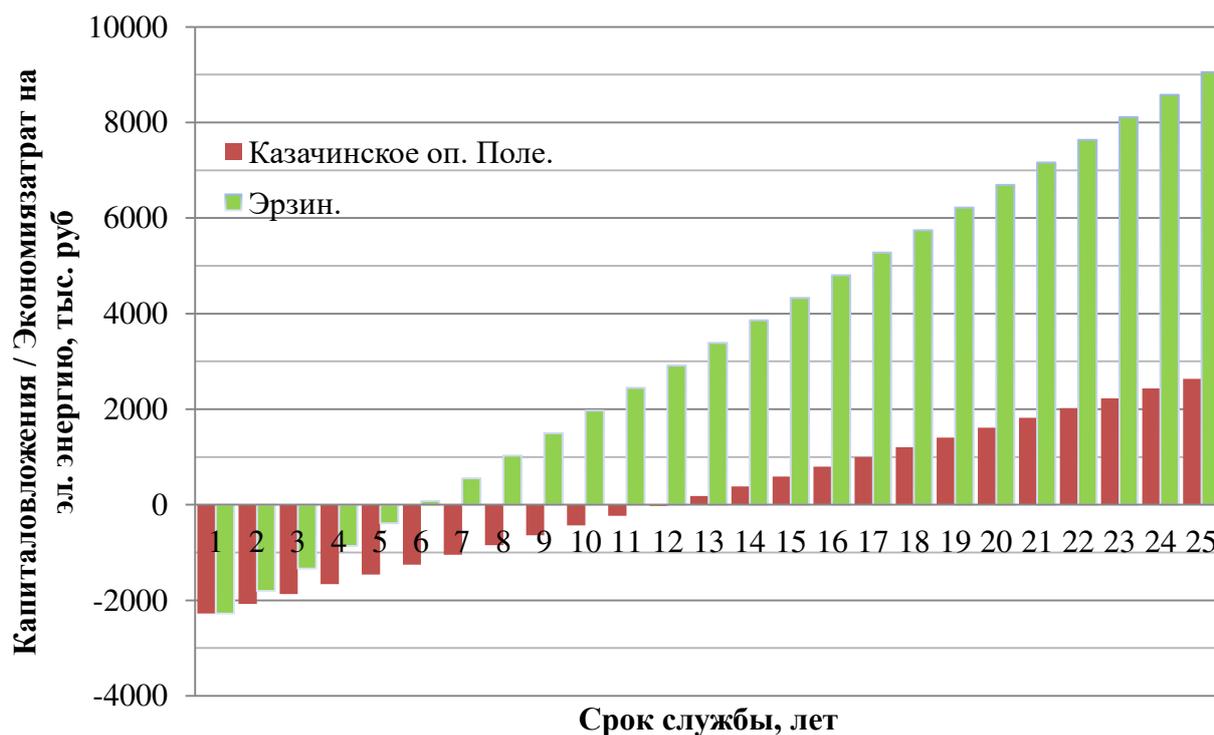


Рис. 3. Окупаемость капиталовложений за счет экономии затрат на электрическую энергию, произведенную сетевой ФЭС компании «Технолайн» мощностью 50 кВт при стоимости электрической энергии 8 руб. за 1 кВт·ч

Заключение. В ходе проведенного литературного обзора установлено, что на российском рынке имеется достаточное количество сетевых ФЭС установленной мощностью от 1 до 80 кВт. Удельная стоимость 1 кВт установленной мощности сетевых ФЭС составляет от 45 тыс. руб. за 1 кВт («Технолайн», $P = 50$ кВт) до 68,5 тыс. руб. за 1 кВт («Хевел», $P = 50$ кВт) и может значительно различаться в зависимости от производителя компонентов ФЭС. Сетевые ФЭС, имеющие меньшую удельную стоимость 1 кВт установленной мощности (по сравнению с автономными или гибридными), показывают большую экономическую эффективность.

Для эффективной работы сетевой ФЭС с возможностью микрогенерации к сетям 0,4 кВ, кроме электроприемников сельскохозяйственного предприятия, осуществляющего установку ФЭС, должны быть подключены электроприемники сторонних потребителей электрической энергии для потребления излишков электрической энергии. Сельскохозяй-

ственному предприятию необходимо скорректировать суточный график нагрузок и по возможности стараться максимально загружать свою сетевую ФЭС собственными электроприемниками и не допускать превышения отдачи мощности в сеть более 15 кВт.

Экономическая эффективность сетевой ФЭС прямо пропорциональна продолжительности солнечного сияния (которое зависит от района использования) и обратно пропорциональна капиталовложениям. Срок окупаемости сетевой ФЭС прямо пропорционален капиталовложениям и обратно пропорционален выработке электрической энергии и тарифу на электрическую энергию. При тарифе на электрическую энергию в 8 руб. за 1 кВт·ч и при удельной стоимости оборудования сетевой ФЭС 45,6 тыс. руб./кВт минимальный срок окупаемости капиталовложений составит четыре года. При увеличении тарифа на электрическую энергию срок окупаемости уменьшается.

Список источников

1. ПАО РусГидро. Красноярскэнергообит. URL: <https://krsk-sbit.ru/kvartiry-i-doma-bez-elektricheskikh-plit-elektrootopitelnyh-ustanovok> (дата обращения: 10.10.2024).
2. География возобновляемых источников энергии / Т.И. Андреев [и др.]. М.: Энергия, 2021. 200 с. DOI: 10.5281/zenodo.5525761. EDN: YNBQPW.
3. Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации: указ Президента РФ от 13.05.2019 № 216. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44252> (дата обращения: 15.10.2024).
4. Об энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810> (дата обращения: 10.10.2024).
5. ЦДУ ТЭК. Центральное диспетчерское управление топливно-энергетического комплекса. URL: <https://www.cdu.ru> (дата обращения: 08.10.2024).
6. Чебодаев С.А. Технология переработки фотоэлектрических модулей // Студенческая наука – взгляд в будущее: мат-лы XVIII Всерос. студ. науч. конф., Красноярск, 15–17 марта 2023 г. Ч. 3. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2023. С. 95–98. EDN: FMRXHY.
7. О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации: постановление правительства Российской Федерации от 02.03.2021 № 299. URL: <https://base.garant.ru/400418448> (дата обращения: 08.10.2024).
8. Группа компаний «Хевел». Солнечная энергетика для бизнеса и дома. URL: <https://www.hevelsolar.com/catalog/network> (дата обращения: 09.10.2024).
9. Технолайн. Решения для автономного и резервного электроснабжения. URL: <https://e-solarpower.ru/solar/solnechnye-elektrostantsii-dlya-doma-i-dachi/ekonomiya-ru> (дата обращения: 10.10.2024).
10. Ваш солнечный дом. URL: <https://shop.solarhome.ru> (дата обращения: 11.10.2024).
11. Эко 50. Источник энергии. URL: <https://eco50.ru/category/setevye-solnechnye-elektrostantsii> (дата обращения: 12.10.2023).
12. Чебодаев А.В. Оценка эффективности применения сетевых фотоэлектрических станций в целях микрогенерации для окрестностей Красноярска // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: мат-лы междунар. науч.-практ. конф., Красноярск, 18–20 апреля 2023 г. / отв. за вып. А.В. Коломейцев, В.Г. Крымкова. Т. 1, ч. 2. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2023. С. 240–248. EDN: LTIVQG.
13. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 21. Красноярский край и Тувинская АССР. Кн. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 312 с.
14. Практикум по применению гидроветроэнергетических установок в сельском хозяйстве / А.В. Бастрон [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2014. 208 с. EDN: WMHTVX.

References

1. PAO RuSGidro. Krasnoyarskehnenergobyt. URL: <https://krsk-sbit.ru/kvartiry-i-doma-bez-elektricheskikh-plit-elektrootopitelnyh-ustanovok> (data obrashcheniya: 10.10.2024).
2. Geografiya vozobnovlyaemykh istochnikov ehnergii / T.I. Andreenko [i dr.]. M.: Ehnergiya, 2021. 200 s. DOI: 10.5281/zenodo.5525761. EDN: YHBQPW.
3. Ob utverzhdenii Doktriny ehnergeticheskoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii: ukaz Prezidenta RF ot 13.05.2019 № 216. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44252> (data obrashcheniya: 15.10.2024).
4. Ob ehnergeticheskoi strategii Rossiiskoi Federatsii na period do 2035 goda: rasporyazhenie pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 09.06.2020 № 1523-r. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74148810> (data obrashcheniya: 10.10.2024).
5. TSDU TEHK. Tsentral'noe dispetcherskoe upravlenie toplivno-ehnergeticheskogo kompleksa. URL: <https://www.cdu.ru> (data obrashcheniya: 08.10.2024).
6. Chebodaev S.A. Tekhnologiya pererabotki fotoehlektricheskikh modulei // Studentcheskaya nauka – vzglyad v budushchee: mat-ly KHVIII Vseros. stud. nauch. konf., Krasnoyarsk, 15–17 marta 2023 g. Ch. 3. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. gos. agrar. un-t, 2023. S. 95–98. EDN FMRXHY.
7. O vnesenii izmenenii v nekotorye akty Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii v chasti opredeleniya osobennosti pravovogo regulirovaniya otnoshenii po funktsionirovaniyu ob"ektov mikrogeneratsii: postanovlenie pravitel'stva Rossiiskoi federatsii ot 02.03.2021 № 299. URL: <https://base.garant.ru/400418448> (data obrashcheniya: 08.10.2024).
8. Gruppa kompanii Khevel. Solnechnaya ehnergetika dlya biznesa i doma. URL: <https://www.hevelsolar.com/catalog/network> (data obrashcheniya: 09.10.2024).
9. Tekhnolain. Resheniya dlya avtonomnogo i rezervnogo ehlektrosnabzheniya. URL: <https://e-solarpower.ru/solar/solnechnye-elektrostantsii-dlya-doma-i-dachi/ekonomiya-ru> (data obrashcheniya: 10.10.2024).
10. Vash solnechnyi dom. URL: <https://shop.solarhome.ru> (data obrashcheniya: 11.10.2024).
11. Ehko 50. Istochnik ehnergii. URL: <https://eco50.ru/category/setevye-solnechnye-elektrostantsii> (data obrashcheniya: 12.10.2023).
12. Chebodaev A.V. Otsenka ehffektivnosti primeneniya setevykh fotoehlektricheskikh stantsii v tselyakh mikrogeneratsii dlya okrestnostei Krasnoyarska // Nauka i obrazovanie: opyt, problemy, perspektivy razvitiya: mat-ly mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Krasnoyarsk, 18–20 aprelya 2023 g. / otv. za vyp. A.V. Kolomeitsev, V.G. Krymkova. T. 1, ch. 2. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. gos. agrar. un-t, 2023. S. 240–248. EDN: LTIBQG.
13. Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Ser. 3. Mnogoletnie dan-nye. Ch. 1–6. Vyp. 21. Krasnoyarskii krai i Tuvinskaya ASSR. Kn. 1. L.: Gidrome-teoizdat, 1990. 312 s.
14. Praktikum po primeneniyu gidrovetroehnergeticheskikh ustanovok v sel'skom khozyaistve / A.V. Bastron [i dr.]. 2-e izd., pererab. i dop. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. gos. agrar. un-t, 2014. 208 s. EDN: WMHTVX.

Статья принята к публикации 09.07.2025/
The article has been accepted for publication 09.07.2025.

Информация об авторах:

Наталья Борисовна Михеева, доцент кафедры «Организация и экономика сельскохозяйственного производства»

Александр Валериевич Чебодаев – доцент кафедры «Электроснабжение сельского хозяйства», кандидат технических наук

Information about the authors:

Natalya Borisovna Mikheeva, Associate Professor at the Department of Organization and Economics of Agricultural Production

Alexander Valerievich Chebodaev – Associate Professor at the Department of Power Supply for Agriculture, Candidate of Technical Sciences

