

Энергетическая эффективность фотоэлектрических станций

В современном мире уже давно признано, что технологии использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в целом оказывают незначительное влияние на окружающую среду по сравнению с традиционными методами производства электроэнергии из ископаемого топлива. В различных литературных источниках данные о минимальном и максимальном выбросах тех и других электростанций по производству энергии варьируются в широких пределах.

Однако даже при этих показателях общий взгляд на возобновляемую энергетику выглядит следующим образом [1]:

1. Возобновляемые источники энергии имеют самый низкий жизненный цикл выбросов углекислого газа по сравнению с традиционными методами производства электроэнергии на основе ископаемого топлива.
2. Большая часть выбросов происходит не в процессе выработки электроэнергии, а в результате производства самих объектов и технологий.
3. Для биоэнергетики прямые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу практически равны нулю.
4. Большинство технологий, использующих ВИЭ, потребляют гораздо меньше воды и меньше загрязняют её.

ВИЭ имеют самый низкий жизненный цикл выбросов углекислого газа по сравнению с традиционными методами производства электроэнергии. А большая часть выбросов происходит не в процессе выработки электроэнергии, а в результате производства самих объектов и технологий ВИЭ

5. Воздействие таких источников на землю, как правило, локализовано, причём некоторые площадки с электростанциями на основе ВИЭ могут быть использованы для других целей.

Эти общие для возобновляемых источников энергии экологические характеристики в полной мере применимы и к солнечной энергии.

Ввод в эксплуатацию новых мощностей солнечных электростанций в мире постоянно растёт и даже опережает, например, внедрение атомных электростанций, и такая тенденция сохраняется десятилетиями. На рис. 1 показана тенденция развития солнечной энергетики по установленной мощности. По данным EPIA [2], к 2030 году она достигнет 1,48 МВт, а к 2050 году — уже 4,6 МВт.

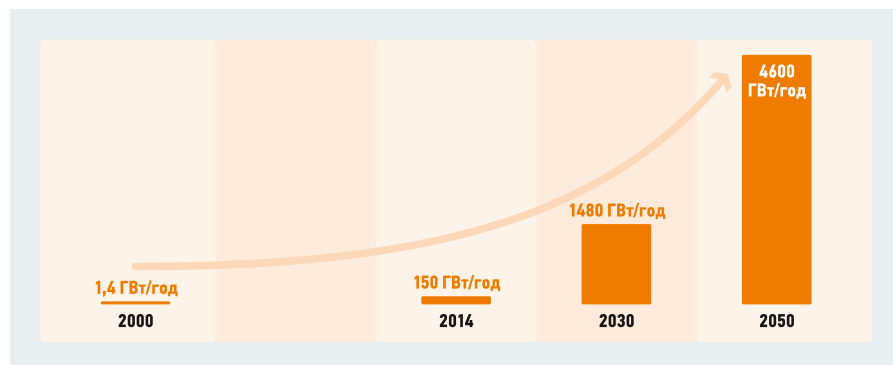


Рис. 1. Тенденция ввода новых мощностей солнечных электростанций в мире

Рецензия эксперта на статью получена 18.06.2022 [The expert review of the article received on June 18, 2022].

УДК 620.9. Научная специальность: 05.14.08.

Энергетическая эффективность фотоэлектрических станций

И. М. Кирпичникова, д.т.н., профессор; С. С. Шипилов, аспирант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» (ЭССиСЭ), Южно-Уральский государственный университет (ЮУрГУ, г. Челябинск)

В статье раскрыты экологические преимущества использования солнечной энергии, рассмотрены составляющие связанной энергии в структуре окупаемости энергии ФЭС. Показано, что основными проблемами в её балансе являются затраты на производство кремния солнечной градации и солнечных ячеек, по сравнению с технологией изготовления тонкоплёночных ФЭС. Приведены результаты расчёта выработки электроэнергии на ФЭС в условиях города Челябинска. Убедительным преимуществом солнечной энергии по сравнению с топливом являются экологические параметры, энергоэффективность и окупаемость фотоэлектрических электростанций.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии; фотоэлектрические электростанции; энергоэффективность.

UDC 620.9. The number of scientific specialty: 05.14.08.

The energy efficiency of photovoltaic power plants

I. M. Kirpichnikova, PhD, Professor; S. S. Shipilov, postgraduate student, the Department of Electric Power Plants, Grids and Power Supply System, South Ural State University (Chelyabinsk city)

The environmental benefits of using solar energy are shown, the components of bound energy in the payback structure of solar energy are considered. It is shown that the main problems in its balance are the costs of producing solar gradation silicon and solar cells, compared with the technology for manufacturing thin-film solar cells. The results of the calculation of electricity generation at the FES in the conditions of Chelyabinsk are presented. The compelling advantages of solar energy over fuels are the environmental performance, energy efficiency and payback of photovoltaic power plants.

Key words: renewable energy sources, photovoltaic power plants, energy efficiency.

Учитывая эту тенденцию, важно оценить энергоэффективность фотоэлектрических электростанций (ФЭС). В отличие от экономической эффективности, энергоэффективность солнечной энергии характеризуется периодом, в течение которого ФЭС генерирует тот же объём энергии, который был затрачен на её создание. Эти затраты включают в себя разведывание энергетических запасов, их добычу и доставку к месту переработки, затраты на изготовление солнечных модулей, включая производство специального оборудования и комплектующих, монтаж, транспорт, эксплуатацию и дальнейшую утилизацию [3].

Период возврата затраченной на строительство энергии определяет срок её окупаемости, который определяется:

$$T_{3.э} = E_{св}/E_T, \text{ лет}, \quad (1)$$

где $E_{св}$ — связанная электрическая энергия, включающая в себя потребление первичной энергии для извлечения сырья и материалов для производства фотоэлектрических элементов, потребление энергии для производства фотоэлектрических систем, потребление энергии для транспортировки материалов, используемых в течение срока службы ФЭ, потребление энергии для построения системы, потребление энергии для эксплуатации в течение жизненного цикла; E_T — среднегодовая выработка электроэнергии на электростанции.

Современные электростанции основаны на кремниевых технологиях. Затраты первичной энергии на технологические процессы производства кремния солнечной градации и изготовления солнечных элементов являются основными в балансе связанной энергии.

Кремний в природе обычно находится в форме песка. Однако в таком виде его использовать нельзя, он требует тщательной очистки для максимального фотоэлектрического эффекта.

Несмотря на большие запасы этого компонента в земной коре, сегодня наблюдается дефицит этого сырья. Дело в том, что в современной электронной промышленности для изготовления электронных часов, компьютеров, мобильных телефонов и других электронных устройств также требуется кремний.

Класс чистоты кремния для производства солнечных модулей не так высок, например, как для изготовления микросхем, и составляет 99,999 % (поликристаллический кремний класс 5N). Процесс получения кремния класса 5N заключается в продувке специальными газами расплава кремния, бора и фосфора и его



Рис. 2. Процесс производства солнечных элементов

последующем затвердевании. Эта технология дешевле, чем получение чистоты 99,999999 % (класс 9N), и снижает общие эксплуатационные расходы.

Современные тонкоплёночные технологии на основе CdTe, A-Si и ClGS используют меньше энергии, так как толщина плёнок, в которых происходит преобразование солнечного излучения в электроэнергию, меньше толщины солнечных кремниевых элементов почти в 100 раз.

Следующим этапом в технологии производства солнечных элементов является вырезание кремниевых заготовок и формирование фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), напоминающих сэндвич или вафлю. Процесс производства монокристаллического, поликристаллического и плёночного ФЭП показан на рис. 2.

Класс чистоты кремния для производства солнечных модулей не так высок, например, как для изготовления микросхем, и составляет 99,999 %

Монокристаллический кремниевый элемент получают экструзией из монослитка цилиндрической формы из расплава поликремния методом Чохральского. Затем слиток разрезают на тонкие пластины с помощью алмазной пилы. Отходы от резки обычно используются вторично для получения нового расплава.

Поликристаллический кремний содержит примеси, что снижает его качество. Сначала методом литья из поликристаллического кремния получают слитки, которые затем разрезают на пластины.

Получение тонкоплёночных фотоэлементов представляет собой непрерывный процесс, в котором тонкие ленты или плёнки выделяются из расплава поликремния. При таком способе производства не образуется отходов.

Сравнение этих методов показывает, что для производства тонкоплёночных фотоэлементов требуется 5 г кремния на 1 Вт мощности, а для моно- и поликристаллических пластин — 8 г на 1 Вт [4].

Стадия производства самих солнечных модулей также отличается способом установки и стоимостью. Сформированные в виде «пластин» солнечные элементы укладываются на алюминиевую подложку и соединяются между собой токопроводящими дорожками. Тонкую полупроводниковую плёнку вставляют на стеклянную подложку или другую плёнку.

Для получения наиболее эффективных кадмиево-теллурических плёнок для производства 1 МВт пиковой мощности требуется 220 кг кремния, что в 36 раз меньше массы кристаллического кремния.

Энергетическая составляющая энергопотребления для транспортировки материалов, для построения и эксплуатации системы в течение жизненного цикла ФЭП, включая финансовую, информационную поддержку и системы безопасности, всё ещё остаётся очень неопределённой. Это вносит неточности в определение времени окупаемости энергии. По мнению некоторых экспертов, этот компонент может быть довольно высоким.

Если значение связанной энергии $E_{св}$ может быть определено на основе опыта эксплуатации, расчётов на стадии проектирования и фактических затрат, то составляющая E_T (среднегодовая выработка электроэнергии на ФЭП) является случайной и зависит от многих параметров:

$$E_T = Q_t \eta S_{см} N, \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (2)$$

где Q_t — суточная суммарная солнечная радиация, поступающая на приёмную поверхность фотопреобразователя, кВт·ч/м²; η — эффективность преобразования солнечного излучения в электроэнергию; $S_{см}$ — общая площадь фотоэлектрических модулей, м²; N — количество календарных дней в рассматриваемом периоде.

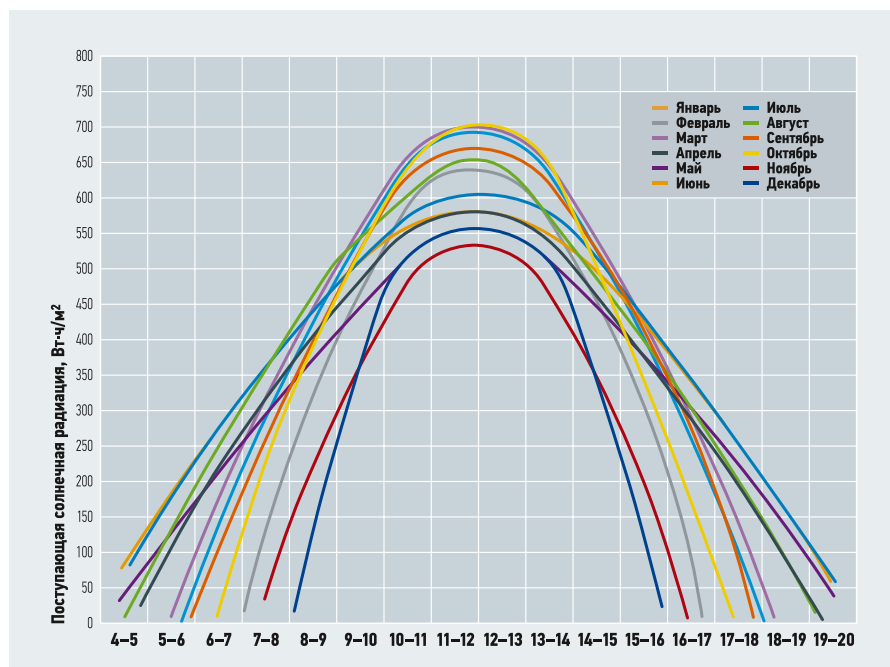


Рис. 3. Суточное почасовое распределение дневной солнечной радиации на горизонтальную поверхность в городе Челябинске

Для города Челябинска, расположенного на территории Южного Урала и имеющего координаты $55^{\circ}9'$ северной широты и $61^{\circ}25'$ западной долготы, суточная (почасовая) суммарная солнечная радиация в средний день каждого месяца имеет следующие значения (рис. 3). Из рис. 3 видно, что максимальная солнечная радиация за каждый месяц в Челябинске ожидается с 11:00 до 13:00 часов.

Энергоэффективность (срок окупаемости) солнечной электростанции для территории Южного Урала при среднегодовом значении связанной энергии 1260 ГВт, согласно расчёту, составляет 20,38 года [5]. Это, на первый взгляд, большое значение определяется географическим положением района со среднегодовой солнечной радиацией 1050–1250 кВт/м² в год. Очевидно, что строительство ФЭС в южных

широтах будет иметь значительно меньший срок окупаемости энергии [6].

Согласно исследованиям, проведённым [7–9] для фотоэлектростанций, построенных в период 2005–2006 годов, срок окупаемости энергии составляет:

- 2,2 года для установок с монокристаллическим кремнием с эффективностью преобразования 14 %;
- 2,0 года для поликристаллического кремния с КПД, равным 13,2 %;
- 1,7 года для гибкой плёнки из кремния с КПД, равным 12,0 %;
- 0,75 года для кадмиево-теллурических модулей с КПД, равным 10,9 %.

Таким образом, внедрение новых и инновационных технологий в солнечной энергетике может значительно снизить затраты и увеличить окупаемость энергии солнечных электростанций.

Анализ работы ФЭС для определения выбросов углекислого газа и оксида азота в атмосферу (выбросы жизненного цикла) в течение всего цикла производства, эксплуатации и утилизации станции показали, что по сравнению с угольными установками они в 35–55 раз меньше по CO_2 и в 44–100 раз по NO_x [1].

Интересной особенностью фотоэлектрических станций, существенно влияющей на их энергоэффективность, является тот факт, что после пуска электростанция сразу же начинает «работать», вкладывая в неё связанную энергию и используя только естественное солнечное излучение. Можно сказать, что в этом смысле топливные электростанции никогда не окупаются, так как в течение срока службы для производства тепловой и электрической энергии им постоянно требуется ископаемое топливо. Это означает, что фотоэлектрические электростанции обладают высокой энергоэффективностью, так как быстро «возвращают» энергию, затраченную на их производство.

Заключение

Таким образом, рассмотренные экологические и энергетические преимущества солнечной энергетики подтвердили целесообразность введения новых мощностей фотоэлектрических станций. Применяемые в настоящее время солнечные элементы на основе кремниевых технологий влияют на значение суммарной связанной энергии и определяют срок окупаемости ФЭС.

Энергоэффективность солнечных электростанций показывает глобальное преимущество солнечной энергии, как одного из видов возобновляемой энергии, перед топливной энергией. ●

1. Безруких П.П. Индикаторы состояния энергоэффективности и возобновляемых источников энергии в условиях информационного кризиса // Вопросы экономики, 2014. №8. С. 92–105.
2. Global Market Outlook for Photovoltaics 2013–2017. European Photovoltaic Industry Association (EPIA). Brussels, Belgium. May 2013. 60 p.
3. Мартынов А.В. Определение энергоэффективных устройств, установок и систем // Новости теплоснабжения, 2010. №10. С. 14–17.
4. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент / Пер. с англ. под ред. М.М. Колтуна. — М.: Энергоатомиздат, 1987. 280 с.
5. Kirpichnikova I.M., Maliugina A.A. The energy efficiency of photovoltaic power plants. Proc. of 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016). May 19–20, 2016. Chelyabinsk, Russia. Procedia Engineering. 2016. Pp. 840–843.
6. Кирпичникова И.М., Малиюгина А.А., Малиюгин С.А. Использование солнечной энергии в сельском хозяйстве // Электротехнические комплексы и системы управления, 2015. №2. С. 76–80.
7. IEA Photovoltaic Power Systems Programme Report. Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems. International Energy Agency. Paris, France. October 2011.

8. Ito Masakazu. Life cycle assessment of PV systems. Tokyo Institute of Technology. Tokyo, Japan. July, 2011.
9. Дубинин Д.В., Лаевский В.Е. Энергоэффективность солнечных батарей в реальных условиях эксплуатации // Известия ТПУ, 2015. Т. 326. №3. С. 58–62.

References:

1. P.P. Bezrukih. *Indikatory sostojaniya jenergoeffektivnosti i vozobnovljajemyh istochnikov jenerгии v uslovijah informacionnogo krizisa* [Indicators of the state of energy efficiency and renewable energy sources in the context of the information crisis]. *Voprosy jekonomiki* ["Questions of Economics" Magazine]. 2014. No. 8. Pp. 92–105. [In Russian]
2. Global Market Outlook for Photovoltaics 2013–2017. European Photovoltaic Industry Association (EPIA). Brussels, Belgium. May 2013. 60 p.
3. A.V. Martynov. *Opreделение jenergoeffektivnyh ustrojstv, ustanovok i sistem* [Definition of energy efficient devices, installations and systems]. *Novosti teplosnabzhenija* ["Heat supply news" Magazine]. 2010. No. 10. Pp. 14–17. [In Russian]
4. A. Farenbruh, R. B'jub. *Solnechnye jelementy: teorija i jeksperiment* [Solar cells: theory and experiment]. Transl. from English and edited by M.M. Koltun. Moscow. *Jenergo-*

- atomizdat* [Publishing House of Energy and Nuclear Industry of the USSR ("Energoatomizdat" Publishers)]. 1987. 280 p. [In Russian]
5. I.M. Kirpichnikova, A.A. Maliugina. The energy efficiency of photovoltaic power plants. Proc. of 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2016). May 19–20, 2016. Chelyabinsk, Russia. Procedia Engineering. 2016. Pp. 840–843.
6. I.M. Kirpichnikova, A.A. Maliugina, S.A. Maliugin. *Ispol'zovanie solnechnoj jenerгии v sel'skom hozjajstve* [Use of solar energy in agriculture]. *Jeletrotehnicheskie komplekсы i sistemy upravlenija* ["Electrotechnical complexes and control systems" Magazine]. 2015. No. 2. Pp. 76–80. [In Russian]
7. IEA Photovoltaic Power Systems Programme Report. Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems. International Energy Agency. Paris, France. October 2011.
8. Ito Masakazu. Life cycle assessment of PV systems. Tokyo Institute of Technology. Tokyo, Japan. July 2011.
9. D.V. Dubinin, V.E. Laevskij. *Jenergoeffektivnost' solnechnyh bateraj v real'nyh uslovijah jekspluatacii* [Energy efficiency of solar panels in real operating conditions]. *Izvestija TPU* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 2015. Vol. 326. No. 3. Pp. 58–62. [In Russian]