



СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

SOLAR POWER PLANTS

Статья поступила в редакцию 22.01.15. Ред. рег. № 2172

The article has entered in publishing office 22.01.15. Ed. reg. No. 2172

УДК 620.91; 62-1/-9

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ
В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ КЫРГЫЗСТАНА**

С.В. Киселева^{1, 2}, Ю.Г. Коломиец¹, О.С. Попель¹, А.Б. Тарасенко¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН
Россия 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2
тел.: (495) 484-23-74; e-mail: tarasenko@energyprojects.ru

²Научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии, Географический факультет МГУ
Россия 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1
тел.: (495) 939-42-57; e-mail: k_sophia_v@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.01.001

Заключение совета рецензентов: 26.01.15 Заключение совета экспертов: 29.01.15 Принято к публикации: 01.02.15

В работе рассмотрены возможности использования солнечной энергии на территории Республики Кыргызстан (РК) для целей электроэнергоснабжения. Проведен анализ источников данных для расчетов солнечных ресурсов. В связи с немногочисленностью актинометрических станций на территории РК рассмотрены международные тематические базы данных, содержащие информацию, достаточную для ресурсных оценок и проектирования. Эти базы данных содержат результаты многолетних наземных измерений, математического моделирования и спутниковых наблюдений. Обоснована адекватность глобальной базы данных с открытым доступом NASA SSE задаче оценки ресурсов солнечной энергии, и проведены расчеты валового потенциала для территории РК. Предложена авторская методика первичной оценки производительности, капитальных затрат и занимаемой площади для сетевой фотоэлектрической станции. Расчеты проведены на основе усредненных за месяц суточных значений инсоляции и среднемесячной температуры. Для учета влияния температуры окружающей среды на мощность фотоэлектрических модулей рассматривались два сценария: максимальное и минимальное значения среднесуточных температур окружающей среды в каждом месяце. Оценки производительности и себестоимости электроэнергии сделаны для станции мощностью 5 МВт в случае размещения ее вблизи городов Бишкек и Ош (северная и центральная часть РК). При этом проведен сравнительный анализ результатов, полученных для нескольких видов фотоэлектрических кремниевых модулей, представленных на рынке: монокристаллических, мультикристаллических и тонкопленочных. Показано, что максимальная производительность сетевой станцией обеспечивается при угле наклона модулей близком к широте местности. Температурная зависимость характеристик модулей вносит наибольший вклад в изменение производительности в летнее время. Расчеты показали также, что использование ФЭМ на основе мультикремния является оптимальным по соотношению «цена – качество» для выбранных условий.

Ключевые слова: солнечная энергетика, оценка ресурсов, фотоэлектростанция, технико-экономические показатели, температурный коэффициент мощности, сетевые инверторы, себестоимость электроэнергии.



THE EFFECTIVENESS OF THE SOLAR ENERGY USE FOR POWER SUPPLY IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF KYRGYZSTAN

S.V. Kiseleva^{1,2}, Y.G. Kolomiets¹, O.S. Popel¹, A.B. Tarasenko¹

¹Joint Institute for High Temperatures RAS
13 Izhorskaya St., Bd. 2, Moscow, 125412 Russian Federation
ph.: (495) 484-23-74, e-mail: tarasenko@energyprojects.ru
²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography
1 Leninskie Gori, Moscow, 119991 Russian Federation
ph.: (495) 939-42-57, e-mail: k_sophia_v@mail.ru

Referred 26 January 2015 Received in revised form 29 January 2015 Accepted 1 February 2015

The paper discusses the possibility of solar energy using in the Republic of Kyrgyzstan (RK) for the purpose of electricity distribution. The data sources analysis for the calculation of solar resources was conducted. Due to the scarcity of solar radiation stations on the territory of the RK, international thematic databases containing sufficient information for resource assessment and design were considered. These databases contain the results of long-term ground-based measurements, mathematical modeling and satellite observations. The paper justifies the compliance of a global database with public access NASA SSE to the problem of solar energy resources estimation, and estimates the gross capacity for the territory of the Kyrgyzstan. The authors propose their method of initial evaluation of performance, capital cost and footprint for network photovoltaic plant. The calculations are performed based on monthly averages of daily insolation and the average temperature. To account for the effect of ambient temperature on the output of PV modules, the paper considers two scenarios: the maximum and minimum daily mean ambient temperatures in each month. Evaluate the performance and the cost of electricity are made for plants with a capacity of 5 MW in the case of placing it near the cities of Bishkek and Osh (northern and central part of the RK). At the same time the authors carry out a comparative analysis of the results obtained for several types of silicon photovoltaic modules on the market today: monocrystalline, multicrystalline and the thin film. It is shown that the maximum performance of the network station is provided at an inclination of modules close to the latitude. The temperature dependence of the module characteristics makes the largest contribution to the change in productivity in the summer. The calculations also show that the multicrystalline photovoltaic modules are optimal in terms of price and quality for selected conditions.

Key words: solar energy, resource assessment, photoelectric, technical and economic parameters, the temperature coefficient of power, network inverters, the cost of electricity.



Киселева Софья
Валентиновна
Sophia V. Kiseleva

Сведения об авторе: к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: физический факультет МГУ (1987), аспирантура того же факультета (1990).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, оценка ресурсов ВИЭ, лабораторное моделирование динамических процессов в океане.

Публикации: более 70, в том числе патентов на изобретения.

Information about the author: Dr. Sc. (Physics and Mathematics), the Senior Researcher of Renewable Energy Sources Laboratory (Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography).

Education: Department of Physics Lomonosov Moscow State University.

Area of researches: renewable energy sources, resource evaluation, ecology-geographical aspects of renewable energy; laboratory modeling of ocean and atmosphere's dynamical process.

Publications: more than 70, including patents.





Попель Олег
Сергеевич
Oleg S. Popel

Сведения об авторе: д. т. н., профессор, заместитель директора по науке, руководитель Научно-исследовательского центра «Физико-технические проблемы энергетики» ОИВТ РАН; председатель Научного совета РАН по нетрадиционным возобновляемым источникам энергии.

Образование: факультет и аспирантура Московского энергетического института по специальности «Инженерная теплофизика».

Область научных интересов: энергетика, энергосбережение, возобновляемые источники энергии.

Публикации: более 250, в том числе более 150 в области возобновляемых источников энергии.

Information about the author: D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Director for Science, the Head of the Research Center of Physical and Technical Problems of Power Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences. Chairman of the RAS Scientific Council on Renewable Energy Sources.

Education: Moscow Power Engineering Institute and postgraduate studies in "Engineering Thermal Physics".

Area of researches: power engineering, energy conservation, renewable energy sources.

Publications: over 250, including more than 150 papers in the field of renewable energy.



Коломиец Юлия
Георгиевна
Julia G. Kolomiets

Сведения об авторе: к. т. н., научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН).

Образование: электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) (2004), аспирантура ОИВТ РАН (2009).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, оценка ресурсов ВИЭ, экономика ВИЭ.

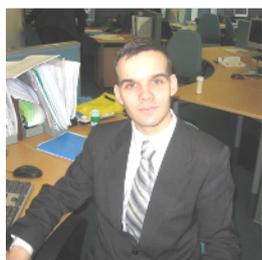
Публикации: более 30; 2 патента на изобретения.

Information about the author: PhD (Engineering), the Researcher of Laboratory of Renewable Energy, Joint Institute For High Temperatures, Russian Academy of Sciences.

Education: Moscow Power Engineering Institute, the Electricity Department (2004) and postgraduate studies in Joint Institute For High Temperatures of RAS (2009).

Area of researches: renewable energy, renewable energy resource assessment, renewable energy economy.

Publications: more than 30; 2 patents.



Тарасенко Алексей
Борисович
Alexei V. Tarasenko

Сведения об авторе: младший научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН.

Образование: Московский инженерно-физический институт (МИФИ), кафедра физики твердого тела

Область научных интересов: инженерные расчеты энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии, фотоэлектрические системы, химические источники тока, наноструктурированные материалы источников тока.

Публикации: 15 печатных работ и более 20 докладов на конференциях.

Information about the author: the Researcher of Joint Institute For High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

Education: Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI), Department of Solid State Physics

Area of researches: engineering calculations of energy systems based on renewable energy, photovoltaic systems, chemical current sources, nanostructured materials for current sources.

Publications: 15 scientific papers and over 20 reports at the conference.

Введение

Республика Кыргызстан (РК) в связи с благоприятными физико-географическими и социально-экономическими факторами является одним из перспективных районов для эффективного использования возобновляемых источников энергии. Широтное расположение республики (от 39 до 43° с.ш.) и пре-

обладание горного рельефа (горные системы Тянь-Шаня и Памиро-Алтая) обеспечивают высокий потенциал солнечной, ветровой и гидроэнергии.

В РК эксплуатируются 15 гидроэлектростанций и две теплоэлектроцентрали суммарной мощностью 3 600 МВт. Ими ежегодно вырабатывается более 13 миллиардов кВтч электроэнергии. Республика экспортирует часть вырабатываемой электроэнергии в

Казахстан, Узбекистан, Таджикистан и Китай. Вместе с тем особенности географического расположения РК привели к разделению энергосистемы страны на две части: юга и севера, причем более 90 % генерирующих мощностей республики находятся на юге, в то время как на севере страны – наиболее освоенной и густонаселенной ее части – имеет место дефицит электроэнергии и месторождений органического топлива. Улучшение электроснабжения севера страны требует строительства передающих и распределительных сетей и сопряжено с огромными инвестициями в данный сектор экономики [1].

В этих условиях представляется актуальным анализ альтернативных возможностей энергоснабжения, в том числе путем более широкого использования ресурсов местных возобновляемых источников энергии. В рамках данной работы рассматриваются перспективы использования солнечной энергии в РК, в частности проводится оценка ресурсов и потенциальной производительности солнечных энергоустановок.

1. Источники данных для анализа ресурсов солнечной энергии в РК

При оценках ресурсов солнечной энергии основными источниками исходной актинометрической информации обычно являются многолетние актинометрические наблюдения, а также результаты математического моделирования, представленные в виде баз данных с различным режимом доступа. Среди баз данных, содержащих наземную актинометрическую и метеорологическую информацию, а также результаты математического моделирования поступления солнечной радиации на земную поверхность, в настоящее время широко используются следующие базы данных:

- ресурс Meteororm, Швейцария [2] (наземные измерения радиации в более чем 1 000 пунктов наблюдения по всему миру);
- программный продукт RETScreen, Канада [3] (наземные измерения суммарной солнечной радиации, температуры окружающего воздуха, скорости ветра на 1 093 метеостанциях мира);
- мировой центр радиационных данных (МЦРД), РФ [4] (данные актинометрических станций, входящих в сеть Всемирной метеорологической организации);
- база данных NASA SSE, США [5].

База данных NASA по сути является наиболее емким источником информации о результатах математического моделирования и многолетних спутниковых измерений падающей солнечной радиации. Среднемесячные и среднегодовые актинометрические и метеорологические данные в БД NASA SSE охватывают всю поверхность земного шара с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$. Широта номенклатуры данных, а также открытый доступ к этому ресурсу определяют его активное использование в расчетах и оценках [6].

Однако, как любые результаты моделирования, данные NASA требуют верификации (сравнения) с наземными актинометрическими измерениями. В работах, выполненных ранее [7, 8], было показано, что погрешность данных базы NASA для территории России не превышает для большей части территории страны 10–15 %, а значит, эта база может быть использована для оценки ресурсов и гелиотехнических расчетов. Моделирование падающей солнечной радиации на приемную поверхность различной ориентации в горах наиболее сложно. Поскольку Кыргызстан – высокогорная страна (свыше 70 % территории республики располагается на высотах от 1 000 до 3 000 м, примерно треть – на высотах от 3 000 до 4 000 м), для целей работы важно было провести верификацию данных NASA по наземным измерениям актинометрических станций РК. Для этого были выбраны 4 актинометрические станции на территории Кыргызстана, а также 21 станция, расположенная в гористых районах Средней Азии и России. Анализ показал, что относительные отклонения (δ) среднегодовых данных NASA SSE по суммам суммарной солнечной радиации от наземных измерений для горных районов не превышает 12 %, кроме двух станций из выборки: Сусамыр (Кыргызстан, 2 700 м над уровнем моря, где $\delta = 20$ %) и станция им. Ак. Н.П. Горбунова (Таджикистан, 4 169 м над уровнем моря, $\delta = 20,7$ %). Для средних значений за зимний период отклонение гораздо выше, но для большинства станций не превышает 15–20 %. Летом отклонение лежит в пределах 12–15% для всех станций сравнения. Таким образом, для большинства проанализированных высокогорных районов относительные отклонения данных NASA SSE от результатов наземных измерений суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность не превышают 10–15 %, что вполне приемлемо для инженерных расчетов эффективности использования солнечных установок и оценки потенциалов солнечной энергии.

2. Оценка ресурсов солнечной энергии в РК

На основе данных NASA SSE и наземных актинометрических измерений авторами статьи по аналогии с [7, 8] для республик Средней Азии и Казахстана создана локальная база данных, содержащая характеристики падающей солнечной радиации, построены карты распределения среднедневных сумм солнечной радиации, включая

- карты распределения средних дневных сумм суммарной солнечной радиации, поступающей на неподвижные поверхности южной ориентации с различным углом наклона к горизонту за различные периоды времени: год, теплое и холодное время года, зима, лето. В качестве примера на рис. 1 приведена карта распределения среднедневных поступлений суммарной солнечной радиации на поверхность южной ориентации с углом наклона к горизонту, равным широте местности, для летнего периода;



– карты распределения средних дневных сумм прямой солнечной радиации, поступающей на следящую за Солнцем подвижную поверхность за различные периоды года, полезные для анализа эффективности использования солнечных установок с концентраторами солнечного излучения.

Установлено, что среднегодовые дневные суммы солнечной радиации, приходящей на неподвижную поверхность различной ориентации в южных районах Средней Азии, превышают 4 кВтч/(м²день) или около 1,5 МВтч/(м²год). В летнее время дневные суммы превышают 7 кВтч/(м²день). Эти показатели

соответствуют наиболее благоприятным для использования солнечной энергии районам мира и превосходят показатели многих европейских стран, где солнечные установки нашли широкое практическое применение. Оценен валовой потенциал солнечной энергии, который для территории Кыргызстана составляет около 35 808 млн. т.у.т./год. По оценкам, приведенным в [9], общий технический потенциал ВИЭ в Кыргызстане составляет порядка 840 млн. т.у.т. Таким образом, развитие солнечной энергетики для республики является одним из перспективных направлений.

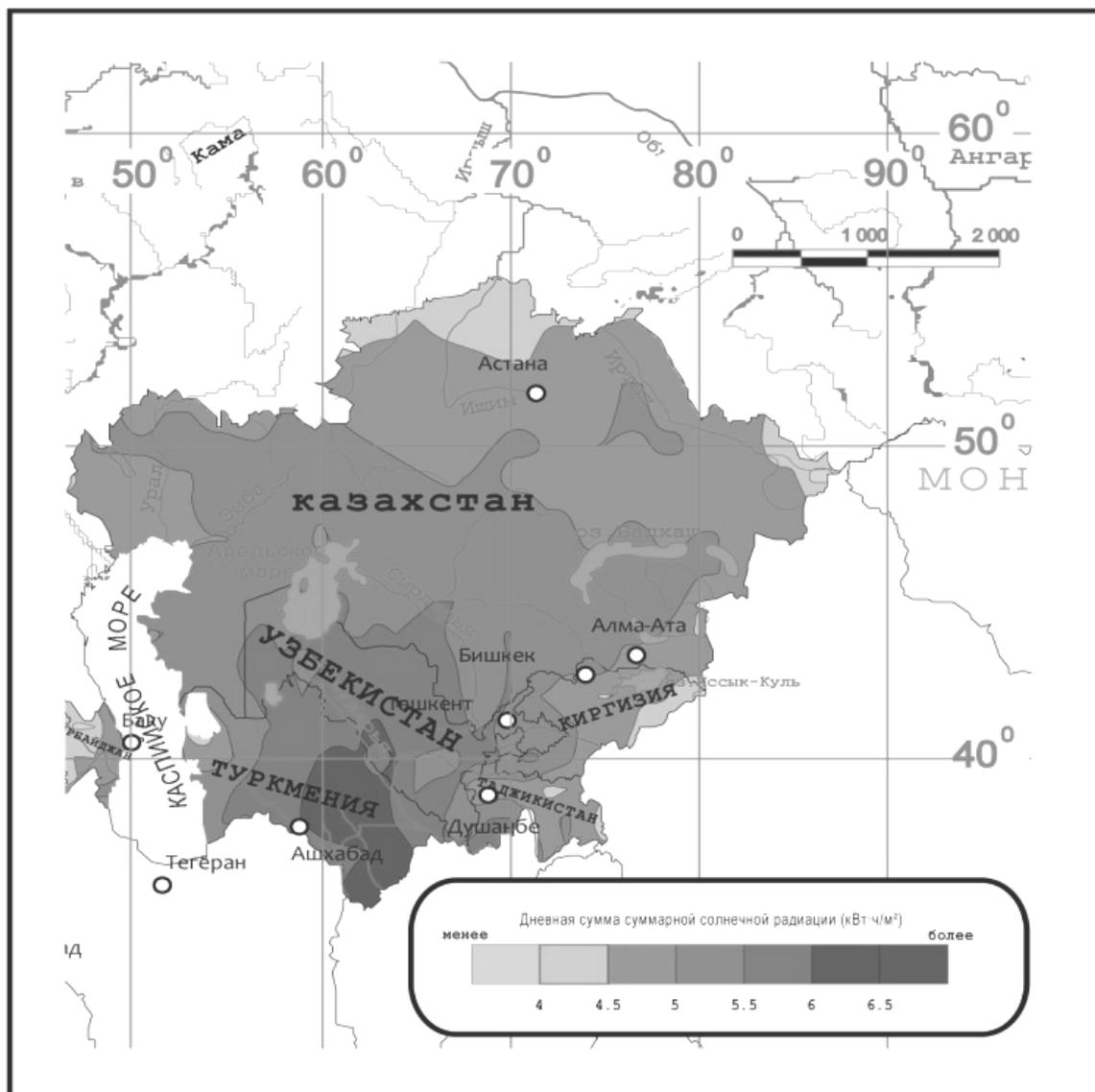


Рис. 1. Распределение средней дневной суммарной солнечной радиации на поверхность южной ориентации с углом наклона к горизонту, равным широте местности, кВтч/м²день (лето)
Fig. 1. The distribution of daily average total solar radiation on the surface, oriented to the south, tilt angle equal latitude of the area, kWh /m²day (summer months)



3. Оценка производительности фотоэлектрической станции на территории РК

Оценим возможную выработку энергии, капитальные затраты и требуемые площади для фотоэлектрической станции при двух вариантах ее размещения: вблизи городов Бишкек и Ош (северная и центральная часть РК). Для выполнения оценок воспользуемся техническими характеристиками оборудования, использованного при создании пилотной сетевой фотоэлектрической станции Кош-Агач-1 в Республике Алтай установленной мощностью 5 МВт [10], а также среднемесячными метеорологическими и климатическими характеристиками выбранных территорий, представленными в базе данных NASA SSE [5].

Произведенную за месяц энергию можно оценить по соотношению

$$W_m = P_m (t_{dm} - 4)(N_d - N_{bd})\eta N_{mod} = P_m (t_{dm} - 4)(N_d - N_{bd})\eta N_{mod} \frac{P_{ФЭС}}{P_0} 10^6, \quad (1)$$

где t_{dm} (ч) – среднемесячная суточная продолжительность солнечного сияния; P_m (Вт) – средняя мощность фотоэлектрического модуля, η – коэффициент потерь (равный произведению КПД инвертора и трансформатора), N_{mod} – количество фотоэлектрических модулей в составе станции, N_d – число дней в месяце, N_{bd} – среднее количество бессолнечных дней в месяце, $P_{ФЭС}$ (МВт) – пиковая мощность фотоэлектрической станции (ФЭС), P_0 (Вт) – пиковая мощность модуля при стандартных условиях тестирования STC (спектр падающего излучения AM1,5; температура модуля 25 °С; интенсивность падающего излучения 1 000 Вт/м²). Множитель $\frac{P_{ФЭС}}{P_0} 10^6$ опре-

деляет количество модулей (ФЭМ), требуемое для создания фотоэлектрической станции. Введение в формулу множителя $(t_{dm} - 4)$ связано с тем, что обычно станция функционирует не весь солнечный день, а только некоторую его часть. Согласно наблюдениям, приведенным в [11], это время относится к периодам рассвета и заката, когда часть ФЭМ станции экранируется соседними рядами модулей, а работа инверторов крайне нестабильна из-за малых мощностей ФЭМ. По практическому опыту продолжительность этого периода времени составляет, как правило, около 4 часов.

Зависимость пиковой мощности модуля от температуры и инсоляции учитывалась в формуле, приведенной в [12]:

$$P_m = P_0 \cdot (G/1000) \cdot (1 + K_{TP} \cdot (T_{mod} - 25)/100), \quad (2)$$

где G (Вт/м²) – среднесуточный поток солнечного излучения в данном месяце, K_{TP} (%/°С) – температурный коэффициент мощности, учитывающий влияние температуры окружающей среды (заявляется производителем модулей), T_{mod} (°С) – текущая температура ФЭП в модуле. Данная формула в упрощенном виде учитывает отклонения условий реальной работы модуля от STC.

Температура модуля определялась как

$$T_{mod} = T_m + G/800 \cdot (T_{oct} - 20), \quad (3)$$

где T_m (°С) – среднесуточная температура окружающей среды в данном месяце, T_{oct} (°С) – установившаяся температура ФЭП (заявляется производителем модулей), измеренная при следующих условиях: интенсивность облучения 800 Вт/м², температура окружающей среды 20 °С, скорость обдувающего модуль потока воздуха 1 м/сек.

Среднесуточный поток солнечного излучения в данном месяце на основе климатических данных NASA SSE можно оценить как

$$G = \frac{A_m}{(t_{dm} - 4)} 1000, \quad (4)$$

где A_m (кВтч/м² в сутки) – среднемесячное значение суточного прихода солнечной радиации для данной местности.

Для учета влияния температуры окружающей среды на мощность ФЭМ рассматривались максимальное и минимальное значения среднесуточных температур окружающей среды в каждом месяце. С учетом приведенных соотношений суммарная производительность станции W_m за год может быть определена суммированием по всем месяцам года. Среднегодовой коэффициент использования энергетического потенциала рассчитывался как отношение среднегодовой производительности к произведению пиковой мощности станции и суммарной продолжительности светлого времени суток за год.

Для оценки затрат на создание ФЭС следует учитывать весь набор основного оборудования, необходимого для ее создания. Современные сетевые солнечные инверторы выполняют две основные функции: преобразование постоянного тока в переменный и экстремальное регулирование выдаваемой ФЭМ мощности. Инверторы, предназначенные для комплектования мощных фотоэлектрических станций, допускают последовательное соединение ФЭМ в линейки, каждая из которых подключается к своему независимому входу, снабженному экстремальным регулятором мощности. При необходимости параллельного соединения модулей используются коммутационные коробки, позволяющие подключить к каждому входу инвертора несколько параллельно соединенных линеек. При расчетах определение чис-



ла ФЭМ, подключаемых к единичному инвертору, проводилось на основе следующих принципов:

1) Суммарное напряжение холостого хода последовательно соединенных ФЭМ не должно превосходить допустимое напряжение холостого хода инвертора, а напряжение рабочей точки не должно выходить за пределы диапазона экстремального регулирования мощности (даже с учетом минимальной температуры по году). Температурная зависимость напряжения в этом случае рассчитывалась по формуле:

$$U(T_m) = U^{STC} \cdot (1 + K_{TP} \cdot (T_{mod} - 25) / 100), \quad (5)$$

где T_{mod} определялось по формуле (3) для наиболее холодного месяца года, U^{STC} – заявляется производителем для напряжения холостого хода модуля, $U_{oc}(B)$ и $U_{mpp}(B)$ – напряжения разомкнутой цепи.

2) Суммарный рабочий ток всех параллельно соединенных линеек не должен превосходить допустимое для инвертора значение.

3) Суммарная пиковая мощность всех присоединенных модулей не должна превышать допустимую мощность инвертора.

В случае тонкопленочных фотоэлектрических модулей рассматривалось их параллельное соединение через коммутационные коробки. Для определения необходимого количества инверторов рассмотрен трехфазный инвертор мощностью до 20 кВт марки SMA SMC 2000TL, предназначенный для комплектования крупных фотоэлектрических станций. Характеристики инвертора приведены в таблице 1, рассматриваемых фотоэлектрических модулей – в таблице 2.

Таблица 1
 Параметры базового инвертора
 Table 1
 Parameters of the basic inverter

Инвертор	SMA SMC 2000TL
КПД	97
Напряжение холостого хода, В	1 000
Напряжение экстремального регулирования (верхний предел диапазона), В	800
Предельный ток, А	36
Предельная мощность, Вт	20 000
Количество входов, шт	6
Цена, евро	2 436

Таблица 2
 Параметры рассматриваемых фотоэлектрических модулей
 Table 2
 Parameters of considered photovoltaic modules

Марка модуля	JA Solar JAP 6	Хевел (аналог - GET AT2)	Sun Power E20/327
Технология	Мульти-Si	a-Si mc-Si	Моно-Si (IBC)
Пиковая мощность, Вт (STC)	310	125	327
Геометрические размеры, мм	1 956×991×45	1 300×1 100×6,7	1 559×1 046×46
Высота, м	1,96	1,3	1,6
Ширина, м	0,99	1,1	1,05
Площадь, м ²	1,9404	1,43	1,68
Температурный коэффициент мощности, %/°C	-0,45	-0,29	-0,38
Напряжение холостого хода, В	46,3	75	64,9
Напряжение рабочее, В	37	54	54,7
Температурный коэффициент напряжения холостого хода, %/°C	-0,33	-0,4	-0,27
Ток рабочий, А	8,37	2,31	5,98
N_{ocr} , °C	47	47	45

Выбор фотоэлектрических модулей определялся следующими принципами. Большую часть мирового рынка ФЭМ занимают мультикристаллические модули, преимущественно китайского или тайваньского производства в силу оптимального соотношения «цена–качество» [13]. После банкротства фирмы Suntech Power Co компания JA Solar является одним из лидеров отрасли, причем модули JA Solar представлены как на российском рынке, так и на рынке стран СНГ. Единственным на сегодняшний день предприятием, выпускающим отечественные фото-

электрические модули, является ООО «Хевел». Поэтому логично рассмотреть использование именно этих ФЭМ в составе станций в Киргизии. Определенный интерес представляет низкий температурный коэффициент мощности этих модулей [12]. Модули фирмы SunPower являются одними из наиболее качественных и дорогих модулей в мире, а их производитель – одним из лидеров рынка, по крайней мере в области модулей с наибольшими значениями КПД.

Для проведения технико-экономических оценок принимались характеристики и цены на фотоэлек-

трические модули, представленные на сайте ООО «Ваш солнечный дом» по состоянию на октябрь 2014 года [14]. Обращение к такой информации связано с тем, что для ввоза в страну модулей, произведенных разными производителями, как правило, привлекаются посредники и обязательны таможенные процедуры. В результате цены на ФЭМ всех производителей будут отличаться от заводских, но в случае ввоза через одну компанию обеспечиваются условия, по крайней мере, близкие к условиям, в которых может быть реализован проект в Киргизии. Модули GET AT2 являются аналогом тонкопленочных кремниевых модулей «Хевел». Отечественные модули серии TCM SB собраны из высококачественных монокристаллических ФЭП компании Sun Power.

Занимаемая фотоэлектрической станцией площадь и количество опорных конструкций определялись по следующему алгоритму. За основу была взята опорная конструкция компании Schletter длиной 25 м. Количество рядов модулей на одной опорной конструкции, тип креплений, угол наклона и высота нижнего края конструкции могут быть изменены по желанию заказчика. Высота нижнего края модуля определяется, как правило, максимальной высотой снежного покрова для выбранной местности. Модули располагались на конструкции в два ряда, рассматривались три варианта угла наклона: угол равный широте местности, угол больше широты местности на 15 градусов и меньше широты местности на 15 градусов. Количество модулей, которые несет одна конструкция, определялось исходя из принятой длины конструкции и геометрии модулей. Максимальная высота конструкции с модулями определялась как

$$H = h_0 + h_1 \cdot n_1 \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

где h_0 (м) – высота нижнего края модулей, h_1 (м) – длина единичного модуля, n_1 – количество рядов модулей по высоте, α – угол наклона модулей к горизонту.

Длина единичной конструкции определялась как произведение ширины единичного модуля на количество модулей в одном ряду. Ширина единичной конструкции рассчитывалась как

$$w = h_1 \cdot n_1 \cdot \cos \alpha. \quad (7)$$

С помощью программного продукта, представленного в открытом доступе [15], для выбранного времени суток и выбранной местности определялись азимутальный угол (β) и высота Солнца над горизонтом (γ). Угол определялся для самого низкого положения Солнца над горизонтом (22 декабря), время определения угла выбиралось на основе допущений, сделанных при выводе формулы (1), то есть на два

часа позже восхода Солнца. На основании полученных данных вычислялось расстояние L между соседними опорными конструкциями, которое позволяет избежать взаимного затенения:

$$L = (H - h_0) / \operatorname{tg} \gamma \times \cos(180 - \beta). \quad (8)$$

Тогда площадь, занимаемая одним рядом ФЭМ с учетом площади прохода между рядами, обеспечивающая отсутствие затенения рядами модулей друг друга,

$$S_p = L_0 \cdot (L + w), \quad (9)$$

где L_0 (м) – длина конструкции с модулями, w – ее ширина. Общее количество таких позиций на площадке фотоэлектрической станции равно отношению общего числа модулей (N_{mod}) к числу модулей на одной позиции. Площадь всей станции можно считать равной суммарной площади позиций (контейнеры с инверторами могут быть расположены вне площадки, занятой конструкциями с модулями). Стоимость опорных конструкций определялась как произведение цены одной из них на их количество. Стоимость строительно-монтажных работ на основании экспертных оценок принималась равной 25 % суммарной стоимости опорных конструкций, так как их монтаж и установка на них модулей являются наиболее трудоемкими операциями при строительстве станции. Стоимость системы молниезащиты определялась исходя из площади, занимаемой станцией; стоимость повышающей трансформаторной подстанции (необходима для повышения напряжения 0,4 кВ, выдаваемого сетевыми инверторами, до 10–35 кВ – рабочего напряжения для региональных распределительных сетей) – исходя из пиковой мощности станции. Капитальные затраты определялись как суммарная стоимость основного оборудования (модули, инверторы, опорные конструкции, система молниезащиты, коммутационные коробки, трансформаторная подстанция).

4. Результаты расчетов и их обсуждение

В качестве примера результаты расчетов среднемесячной производительности ФЭС пиковой мощностью 5 МВт для разных месяцев и разных углов наклона для площадки г. Бишкек представлены на рисунке 2. Для условий г. Ош и других типов ФЭМ характер зависимостей качественно сохраняется.



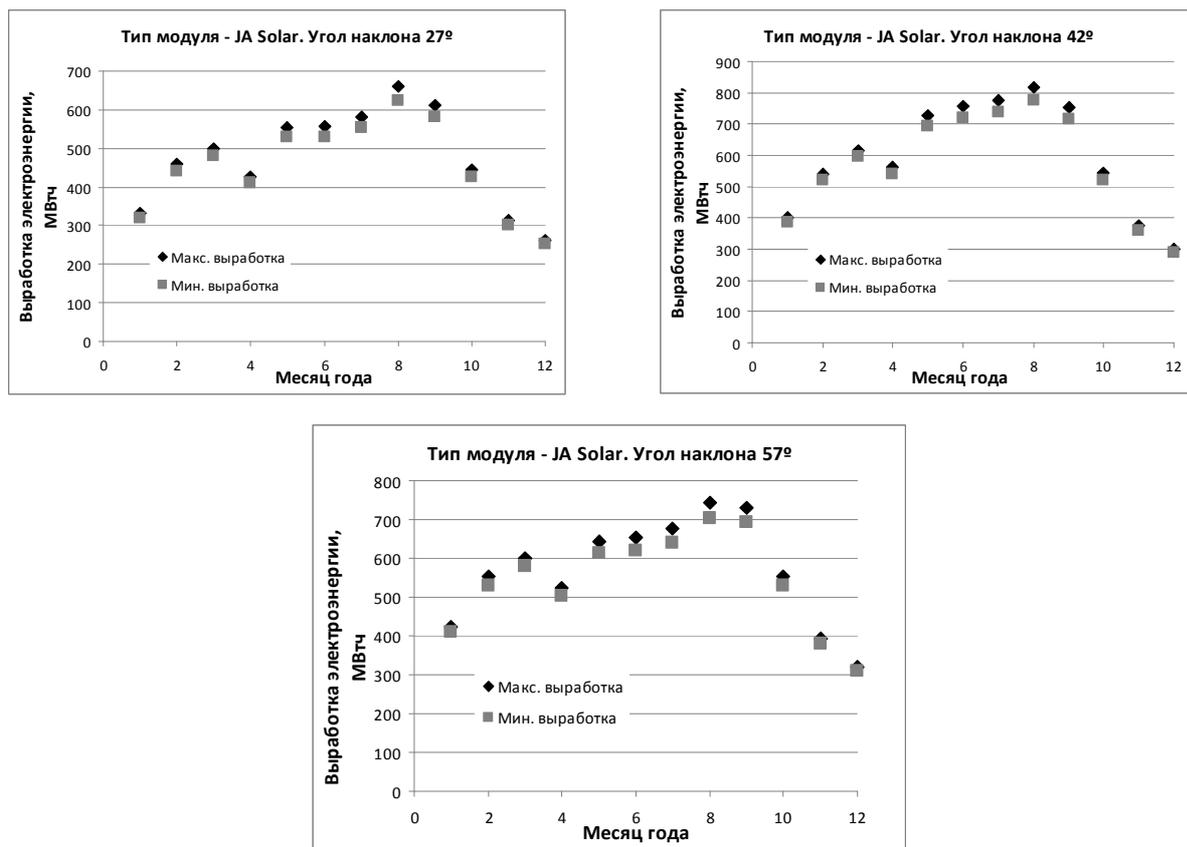


Рис. 2. Среднемесячная производительность фотоэлектрической станции пиковой мощностью 5 МВт на основе модуля JA Solar для различных углов наклона
Fig. 2. The average monthly performance of photovoltaic plant (peak power of 5 MW) based on JA Solar module for different tilt angle

Результаты технико-экономических оценок для площадки г. Бишкек представлены в таблице 3.

Результаты технико-экономических оценок работы фотоэлектрической станции пиковой мощностью 5 МВт для климатических условий г. Бишкек

The results of the technical and economic evaluations of the photovoltaic plant (peak power of 5 MW) for the climatic conditions in Bishkek

Таблица 3

Table 3

Угол наклона, град	27	42	57	42	42
Тип ФЭП	Мульти-Si	Мульти-Si	Мульти-Si	a-Si mc-Si	Mono-Si(IBC)
Максимальная усредненная годовая выработка, МВтч	5 696	7 175	6 807	7 171	7 217
Минимальная усредненная годовая выработка, МВтч	5 452	6 860	6 512	6 968	6 951
Себестоимость энергии при 10 летнем сроке возврата инвестиций в строительство ФЭС, евро/кВтч	0,11	0,09	0,09	0,13	0,15
Максимальное значение среднегодового коэффициента использования энергетического потенциала	26	33	31	33	33
Минимальное значение среднегодового коэффициента использования энергетического потенциала	25	31	30	32	32
Площадь станции, га	7,91	9,46	11,82	17,38	9,52
Удельная стоимость, евро/Вт(пик)	0,81	0,81	0,81	1,20	1,83



В таблице 4 представлена структура основных капитальных затрат для различных вариантов сооружения станции.

Таблица 4

Структура основных капитальных затрат на сооружение станции при использовании ФЭМ различных типов (доля от общей стоимости)

Table 4

Structure of capex under different types of photovoltaic modules (share of the total cost)

Угол наклона, град	42	42	42
Тип модулей	Мульти-Si	a-Si mc-Si	Mono-Si(IBC)
Модули	0,64	0,65	0,83
Инверторы	0,12	0,07	0,05
Опорные конструкции	0,12	0,16	0,06
Строительно-монтажные работы	0,03	0,04	0,01
Система молниезащиты	0,00	0,00	0,00
Трансформаторная подстанция	0,08	0,05	0,05
Коммутационные коробки	0,00	0,03	0,00

Анализ полученных результатов показывает, что максимальная производительность сетевой станции обеспечивается при угле наклона близком к широте местности. Увеличение угла наклона модулей ведет к росту площади станции, так как расстояние между опорными конструкциями в этом случае увеличивается во избежание взаимного затенения.

Температурная зависимость характеристик модулей вносит наибольший вклад в изменение производительности в летнее время. При этом максимальную выработку электроэнергии обеспечивают ФЭМ на основе высокоэффективных монокристаллических ФЭП (SunPower) в силу более слабой зависимости параметров от температуры окружающей среды. При этом себестоимость энергии от этих ФЭМ достаточно высока, что снижает конкурентоспособность по сравнению с другими технологиями. Основными недостатками тандемных тонкопленочных модулей представляются как относительно высокая стоимость, так и (в большей мере) низкий КПД, что требует больших площадей для сооружения станции, значительного количества опорных конструкций и трудозатрат на монтаж и обслуживание станции. Расчеты показывают, что использование ФЭМ на основе мультикремния является на сегодняшний день оптимальным по соотношению «цена – качество».

Результаты расчетов для г. Ош практически совпадают с таковыми для Бишкека.

За счет более благоприятных климатических условий себестоимость вырабатываемой энергии для г. Ош несколько ниже, при этом максимальная производительность достигается при угле наклона, равном 25°. За счет меньшего угла наклона ФЭМ несколько уменьшается занимаемая станцией площадь. Остальные тенденции, выявленные для г. Бишкек, сохраняются.

Из таблицы 4 следует, что наибольший вклад в стоимость электростанции и соответственно себестоимость произведенной электроэнергии вносит стоимость ФЭМ. Цены на ФЭМ в основном определяются степенью локализации, объемами и уровнем автоматизации производства, а также выбором поставщиков исходных материалов. Наиболее низкие

цены на модули сегодня на рынке у китайских поставщиков, имеющих вертикально-интегрированное производство «от песка» до модулей мощностью в несколько сотен МВт(пик) в год. Анализ чувствительности экономических показателей на примере площадки вблизи г. Ош показал, что при снижении цены ФЭМ до 0,5 евро/Вт(пик), что с учетом тенденций развития рынка вполне вероятно уже в ближайшие годы, возможно уменьшение стоимости генерируемой электроэнергии примерно до 7 евроцентов/кВтч. При увеличении цены ФЭМ до 2 евро/Вт(пик) (примерная цена ФЭМ казахстанского предприятия «Астана-Солар» производительностью около 50 МВт/год) себестоимость электроэнергии возрастает до 16 евроцентов/кВтч. Следует отметить, что выполненные экономические оценки не учитывают затраты на обслуживание заемных средств на строительство ФЭС, которые могут увеличить приведенные значения стоимости электроэнергии. По опыту эксплуатации действующих в разных странах ФЭС эксплуатационные затраты невелики и лежат в пределах точности выполненных оценок.

5. Выводы

На основе разработанной инженерной методики анализа технико-экономических показателей фотоэлектрических станций выполнена оценка эффективности создания ФЭС на территории Республики Кыргызстан. Республика в целом характеризуется высоким потенциалом солнечной энергии, что создает предпосылки для реализации крупных проектов ФЭС с относительно малыми сроками возврата инвестиций. Выполнены оценки производительности ФЭС с различными типами фотоэлектрических модулей, расположенной в районах гг. Бишкек и Ош. Более эффективным представляется размещение станции в районе г. Ош и использование мультикристаллических ФЭМ. Следует отметить существенную сезонную неравномерность выдачи мощности, что требует разработки решений по ее компенсации. Ожидаемая стоимость вырабатываемой ФЭС электроэнергии в условиях РК без учета затрат на обу-



живание заемных средств на строительство электростанции составляет около 10 евроцентов/кВтч, что при наличии государственной поддержки, характерной для большинства стран уделяющих внимание приоритетному развитию экологически чистых возобновляемых источников энергии, может быть приемлемо для ряда потребителей испытывающих дефицит электроэнергии в северных районах республики. Для накопления опыта создания и эксплуатации ФЭС и дальнейшего уточнения методик и технико-экономических оценок представляется целесообразным создание пилотных фотоэлектрических станций небольшой мощности, оснащенных системами объективного мониторинга.

Благодарность

Исследование проводилось при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-90105).

Список литературы

1. Касымова В., Баев Б. Энергетика Кыргызстана: состояние отрасли и перспективы межгосударственного сотрудничества // Центральная Азия и Кавказ. 2007. Выпуск 6 (54). С. 116–127.
2. Meteororm [Электронный ресурс] URL: http://www.meteororm.ch/en/business_fields/solar_energy/meteororm/
3. RETScreen International. Renewable energy decision support center. 2010. [Электронный ресурс] URL: <http://www.etscreen.net>
4. Мировой центр радиационных данных ГГО им. А.И. Воейкова [Электронный ресурс] URL: 2014 <http://wrdc.mgo.rssi.ru>
5. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set [Электронный ресурс] URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
6. Гридасов М.В., Киселева С.В., Нефедова Л.В., Попель О.С., Фрид С.Е. Разработка геоинформационной системы «Возобновляемые источники энергии России» // Теплоэнергетика. 2011. №11. С. 38–45.
7. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М.: Изд-во МФТИ. 2010. 83 с.
8. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): Учебное пособие / Попель О.С. и др. М.: Изд-во МФТИ, 2010. 56 с.
9. Web-сайт Time.KG [Электронный ресурс] URL: <http://www.time.kg/vremya-ne-zhdet/6468-associaciya-vie-kr.html>, дата обращения 07.11.2014г
10. Web-сайт ООО «Хевел» [Электронный ресурс] URL: <http://www.hevelsolar.com/press/news/131.php>, дата обращения 27.11.2014 г.
11. Бобыль А.В., Киселева С.В., Кочаков В.Д., Орехов Д.Л., Тарасенко А.Б., Терукова Е.Е. Технич-

экономические аспекты сетевой солнечной энергетики в России // Журнал Технической Физики. 2014. Вып. 04. С. 85–93.

12. Унтила Г.Г., Закс М.Б. Кремниевая фотоэнергетика: состояние и основные направления развития // Теплоэнергетика. 2011. № 11. С. 46–59.

13. Калабушкина Н.М., Киселева С.В., Михайлин С.В., Тарасенко А.Б., Усанов А.Б. Традиционные и перспективные фотоэлектрические модули и их применение в фотоэнергетических системах // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). 2013. № 13. С. 1–9.

14. Web-сайт ООО «Ваш Солнечный Дом [Электронный ресурс] URL: <http://www.solarhome.ru/ru/rezerve/solargrid.htm>, дата обращения 21.10.2014г.

15. Web-сайт Департамента Коммерции США, NOAA Sola Calculator [Электронный ресурс] URL: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>, дата обращения 01.12.2014 г.

References

1. Kasymova V., Baetov B. Ënergetika Kyrgyzstana: sostoânie otrasli i perspektivy mežgosudarstvennogo sotrudničestva. *Central'naâ Aziâ i Kavkaz*, 2007, issue 6 (54), pp. 116–127 [in Russ.].
2. Meteororm. Available at: http://www.meteororm.ch/en/business_fields/solar_energy/meteororm/
3. RETScreen International. Renewable energy decision support center. 2010. Available at: <http://www.etscreen.net>
4. Mirovoj centr radiacionnyh dannyh GGO im. A.I. Voejkova. 2014. Available at: <http://wrdc.mgo.rssi.ru>
5. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. Available at: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
6. Gridasov M.V., Kiseleva S.V., Nefedova L.V., Popel O.S., Frid S.E. Razrabotka geoinformacionnoj sistemy «Vozobnovlâemye istočniki ènergii Rossii». *Teploènergetika*, 2011, no. 11, pp. 38–45 [in Russ.].
7. Popel O.S., Frid S.E., Kolomic Yu.G., Kiseleva S.V., Terehova E.N. Atlas resursov solnečnoj ènergii na territorii Rossii. Moscow: MFTI Publ., 2010, 83 p. [in Russ.].
8. Klimatičeskie dannye dlâ vozobnovlâemoj ènergetiki Rossii (Baza klimatičeskih dannyh): a textbook / Popel O.S. et al. Moscow: MFTI Publ., 2010, 56 p. [in Russ.].
9. Web-site of Time.KG Available at: <http://www.time.kg/vremya-ne-zhdet/6468-associaciya-vie-kr.html> (07.11.2014).
10. Web-site of LLC «Hevel» Available at: <http://www.hevelsolar.com/press/news/131.php> (27.11.2014).
11. Bobyl A.V., Kiseleva S.V., Kochakov V.D., Orehov D.L., Tarasenko A.B., Terukova E.E. Tehniko-èkonomičeskie aspekty setevoj solnečnoj ènergetiki v



Rossii. *Žurnal Tehničeskoj Fiziki*, 2014, issue 04, pp. 85–93 [in Russ.].

12. Untila G.G., Zaks M.B. Kremnievaâ fotoènergetika: sostoânie i osnovnye naprav-leniâ razvitiâ. *Teploènergetika*, 2011, no. 11, pp. 46–59[in Russ.].

13. Kalabushkina N.M., Kiseleva S.V., Mihajlin S.V., Tarasenko A.B., Usanov A.B. Tradicionnye i perspektivnye fotoelektričeskie moduli i ih primenenie v fotoèner-getičeskih sistemah. *International Scientific*

Journal «Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ» (ISJAEE), 2013, no. 13, pp. 1–9 [in Russ.].

14. Web-site LLC «Vaš Solnečnyj Dom. Available at: <http://www.solarhome.ru/ru/rezerve/solargrid.htm> (21.10.2014).

15. Web-site of US Department of Commerce, NOAA Sola Calculator. Available at: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/> (01.12.2014).

Транслитерация по ISO 9:1995



**21-я международная специализированная
выставка-форум «Энергетика»
Конкурс «Инновации в энергетике»**

10 - 13 февраля 2015 г.

**Выставочный центр «Экспо-Волга»
г. Самара, ул. Мичурина, 23 А**

www.energysamara.ru