



АГЕНТСТВО КОНСУЛЬТАЦИЙ И УПРАВЛЕНИЯ В
СТРОИТЕЛЬСТВЕ
«КОНУС»

Аналитическая записка

**РАСЧЕТ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
И СТОИМОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА
В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ В РАЗЛИЧНЫХ
РЕГИОНАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Д.С.Визерский

Москва
2017

В последнее десятилетие, в связи с дефицитом углеводородного топлива, особенно в странах западной Европы все актуальней встает вопрос использования экологически чистых альтернативных источников энергии, таких как энергия солнца и энергия ветра. В данном аналитическом отчете будет рассмотрено преобразование энергии солнца в электрическую, способы ее накопления, а также себестоимость производства электроэнергии путем преобразования энергии солнца и целесообразность использования таких систем на территории Российской Федерации при существующих ценах на первичные энергоносители.

Принцип работы преобразователя солнечного излучения основанного на р-п переходе.

Принцип работы преобразователя энергии солнечного излучения солнечной фотоэлектрической установки (далее по тексту - СФЭУ) построен на фотоэлектрическом эффекте (фотоэффекте). При рассеивании фотона на внешнем электронном облаке атома облучаемого элемента, энергия фотона $E=hq$ (где q – частота волны, постоянная Планка) переходит электрону на внешней электронной орбитали, что провоцирует отрыв электрона с внешнего энергетического уровня атома. Состояние системы (положение электрона), с которой происходит взаимодействие фотона, описывается уравнением Шредингера.

В твердом теле атомы находятся друг от друга на расстоянии порядка атомного размера, поэтому в нем валентные электроны могут переходить от одного атома к другому. Однако этот процесс не приводит непосредственно к электропроводности, так как в целом распределение электронной плотности жестко фиксировано, Например, в германии и кремнии два электрона осуществляют ковалентную связь между двумя соседними атомами в кристалле. Чтобы создать проводимость, необходимо разорвать хотя бы одну из связей, удалить с нее электрон и перенести его в какую-либо другую ячейку кристалла, где все связи заполнены, и этот электрон будет лишним.

такой электрон в дальнейшем переходит из ячейки в ячейку. Являясь лишним, он переносит с собой излишний отрицательный заряд, т.е. становится электроном проводимости.

Разорванная связь становится блуждающей по кристаллу дыркой, поскольку электрон соседней связи быстро занимает место ушедшего. Недостаток электрона у одной из связей означает наличие у пары атомов единичного положительного заряда, который переносится вместе с дыркой. Электроны и дырки - свободные носители заряда в полупроводниках. В идеальных кристаллах, не имеющих ни примесей, ни дефектов, возбуждение одного из связанных электронов и превращение его в электрон проводимости неизбежно вызывает появление дырки, так что концентрации обоих типов носителей равны между собой.

Если бы данные частицы не имели заряда, то в этом случае произошло бы хаотическое перемешивание, но этому препятствует электрическое поле, возникающее вследствие вывода системы из равновесного состояния, происходящего при отрыве электрона с внешнего энергетического уровня атома поверхностного слоя, где образуется избыточный положительный заряд. При образовании избыточного положительного заряда, электроны атомов более глубоких слоев начинают подниматься вверх, при этом они рекомбинируют (образуют связи) с образованными в процессе фотоэффекта ионами, но посредством фотоэффекта связь снова нарушается и электрон становится свободным, при этом он улавливается внешним электродом образованным сетью проводников и направляется в электрическую сеть.

В толще кристалла, на границе n – области (области электронной проводимости) и p – области (области дырочной проводимости), образуются граничащие между собой зоны положительно и отрицательно заряженных ионов, соответственно. А посредством рекомбинации, при взаимодействии этих зон, образуется препятствующих миграции основных носителей заряда слой неподвижных нейтрально заряженных частиц. Данное

условие препятствует миграции дырок в n – область, которые достигнув зоны раздела будут отброшены зоной положительно заряженных частиц в зоне проводимости. В тоже время, электрон, добравшийся до барьера, будет затянут этой зоной в область электронной проводимости.

Так как в случае электрической сети, мы имеем дело с замкнутым контуром, то все электроны, захваченные катодом в зоне электронной проводимости, пройдя цикл возвращаются в область с проводимостью дырочного типа, где рекомбинируют и начинают новое движение через $p - n$ – переход в сторону катода.

Типы существующих солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ)

На данный момент существует несколько типов преобразователей солнечной энергии в электрическую энергию на базе полупроводниковых материалов на основе кремния (рассмотрение солнечных элементов на основе арсенида галлия и пр. в объеме данного отчета рассматриваться не будет в виду специфики направленности использования и стоимости производства).

1. Панели из монокристаллического кремния (КПД 12%);
2. Панели из поликристаллического кремния (КПД 8%);
3. Панели из аморфного кремния (КПД 5%);
4. Многослойные фотоэлементы, работающие по методу преобразования концентрированного солнечного излучения (КПД 20% - 40%).

Многослойные фотоэлементы, работающие по методу преобразования концентрированного солнечного излучения, не рассматриваются в объеме данного аналитического отчета, в виду их неприменимости на объектах жилищного строительства (обязательным условием является координация по нормали к солнечному лучу) и отсутствия на данный момент массового производства.

Также необходимо отметить, что фактические значения КПД солнечных панелей, определяемых в процессе эксплуатации, достаточно сильно отличаются от значений, полученных в лабораторных условиях, которые нередко указываются поставщиками оборудования в рекламных целях. В данном отчете рассматриваются значения КПД установленные при практическом использовании.

Исходные данные для анализа.

В рамках статьи будут рассмотрены эффективность СФЭУ из установленных горизонтально кремниевых панелей (автоматически настраивающиеся в плоскость нормальную солнечному лучу установки, в связи со сложностью конструкции, в объеме данного аналитического отчета не рассматриваются).

В качестве аккумуляторных батарей будут рассмотрены кислотные аккумуляторы закрытого типа. Будем считать аккумулятор идеальным, отсутствует саморазряд, при этом аккумулятор способен дозаряжаться в течение времени года с избытком солнца, выходя на максимум заряда к точке пересечения графика суточного потребления электроэнергии с графиком вырабатываемой СФЭУ в течение суток электроэнергии. Инверторы напряжения, кабельные линии и системы автоматизации при расчете стоимости в рамках данного аналитического отчета не учитываются.

Для индивидуального дома с газовой электроплитой, без системы кондиционирования и количеством проживающих 5 чел, данный показатель составляет приблизительно 350 кВт*ч/мес., или 4,2 МВт*ч/год. (1,26 ГДж/мес или 15,12 ГДж/год), стоимость электроэнергии 4,02 руб/кВт

В качестве регионов использования СФЭУ для данной аналитической исследования принимаются Южный (г. Сочи), Центральный (г. Москва) и Северо-западный (г. Петрозаводск) федеральные округа.

На основании Справочника по климату СССР определим энергию солнечного излучения падающего на горизонтальную плоскость или

нормально - ориентированную плоскость в течение годового цикла (таблица 1).

Таблица 1.

	Москва	Сочи	Петрозаводск
Количество энергии падающей на горизонтальную плоскость, МДж/м ² *год	3670	4900	3100
Среднемесячная освещенность горизонтальной поверхности, МДж/м ² *мес	306	408	258
Количество солнечной энергии поступающей на нормально ориентированную к солнечному излучению поверхность, МДж/м ² *год	5450	7670	5270
Среднемесячная освещенность нормально ориентированной поверхности, МДж/м ² *мес	454	640	439

Расчет себестоимости электроэнергии производимой неподвижными, горизонтально расположенными солнечными элементами.

Для расчета оптимальной площади солнечных элементов, расчета емкости аккумуляторных батарей и экономической целесообразности применения СФЭУ на основании общедоступных прайс-листов и технических данных определяем удельную стоимость солнечных панелей и аккумуляторных батарей.

Таблица 2.

Тип панели	Аморфный кремний в виде пленок	Поликристаллический кремний	Монокристаллический кремний
Стоимость за м ² , руб	10 000	8 000	15 000
КПД, %	5	8	12
Вес, кг/м ²	1,5	14	14
Срок службы	10	25	25

фотоэлемента, год			
-------------------	--	--	--

Стоимость аккумуляторной батареи составляет 1500 руб/МДж, срок службы 10 лет (значения приняты по кислотному аккумулятору марки leoch FT 12-200)

Удельная вырабатываемая энергия в течение годового цикла МДж/м²*год.

Таблица 3.

Тип панели	Аморфный кремний в виде пленок	Поликристаллический кремний	Монокристаллический кремний
Москва	183,5	293,6	440,4
Сочи	245	392	588
Петрозаводск	155	248	372

Для более детального анализа необходимо определить суммарный уровень солнечной радиации попадающей на горизонтальную плоскость в зависимости от продолжительности светового дня, уровня облачности и азимута солнца. Следовательно, производство электроэнергии из энергии солнца, следует рассматривать по месяцам. В случае рассмотрения помесечного производства энергии возможно найти экономический баланс между площадью солнечных панелей и емкостью аккумуляторных батарей.

В противном случае, при минимизации площади солнечных элементов емкость аккумуляторных устройств будет наибольшей.

Суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность при действительных условиях облачности, МДж/м²*мес.

Таблица 4.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Москва	58	130	270	388	563	615	568	462	288	134	56	31
Сочи	136	203	326	446	610	710	732	645	467	329	190	117
Петрозаводск	25	73	222	346	508	574	540	377	203	92	25	8

Исходя из метода граничных значений, путем перебора значений определяем значения параметров, при которых соотношение цены на фотоэлементы и солнечные батареи является оптимальным. В первом приближении (погрешность до 10%) получается, что площадь солнечных панелей должна полностью обеспечивать объект электрической энергией в течение предпоследнего по значению суммарной солнечной радиации месяца. Разница в потребляемой и производимой энергии наименьшего по значению месяца компенсируется аккумуляторными батареями.

Стоимость солнечных фотоэлектрических установок, без учета монтажа.

Тип панели	Аморфный кремний в виде пленок	Поликристаллический кремний	Монокристаллический кремний
Москва, руб	5 343 750	3 093 750	3 656 250
Площадь солнечных панелей, м ²	450	280	190
Емкость аккумуляторов, МДж	560	560	560
Сочи	2 052 500	1 389 500	1 555 000
Площадь солнечных панелей, м ²	132	83	55
Емкость аккумуляторов, МДж	485	485	485
Петрозаводск	11 365 200	6 325 200	7 585 200
Площадь солнечных панелей, м ²	1008	630	420
Емкость аккумуляторов, МДж	860	860	860

Для определения целесообразности применения СФЭУ, необходимо определить исходя из указанных условий себестоимость производства единицы энергии учитывая стоимость капитальных затрат и эксплуатационный ресурс элементов системы.

Тип панели	Аморфный кремний в виде пленок	Поликристаллический кремний	Монокристаллический кремний
Москва			
Стоимость панелей, руб	4 500 000	2 250 000	2 812 500
Срок службы солнечных панелей, год	10	25	25
Стоимость аккумуляторов, руб	843 750	843750	843750
Срок службы аккумуляторов, год	10	10	10
Амортизация за 25 лет, руб	13 360 000	4 360 000	4 920 000
Кол-во произведенной энергии, МДж	2 004 200	2 004 200	2 004 200
Кол-во потребленной энергии, МДж	378 000	378 000	378 000
Кол-во избыточной энергии сгенерированной СФЭУ, МДж	1 626 200	1 626 200	1 626 200
Стоимость электроэнергии приведенная к потреблению, руб/МДж (руб/кВт*ч)	35,3 (127)	11,5 (41,5)	13,0 (47)

Стоимость электроэнергии приведенная к произведенной, руб/МДж (руб/кВт*ч)	6,7 (24)	2,2 (7,8)	2,5 (8,8)
Сочи 1			
Стоимость панелей, руб	1 325 000	665 000	830 000
Срок службы солнечных панелей, год	10	25	25
Стоимость аккумуляторов, руб	725 000	725 000	725 000
Срок службы аккумуляторов, год	10	10	10
Амортизация за 25 лет, руб	5 125 000	2 447 500	2 642 500
Кол-во произведенной энергии, МДж	814 000	814 000	814 000
Кол-во потребленной энергии, МДж	378 000	378 000	378 000
Кол-во избыточной энергии сгенерированной СФЭУ, МДж	436 000	436 000	436 000
Стоимость электроэнергии приведенная к потреблению, руб/МДж (руб/кВт*ч)	13,6 (48,8)	6,47 (23,3)	7,0 (25,2)
Стоимость электроэнергии приведенная к	6,3	3,0	3,3

произведенной, руб/МДж (руб/кВт*ч)	(22,7)	(10,8)	(11,7)
<p>Сочи 2</p> <p>Дополнительно рассматривается вариант с гарантированным обеспечением электроэнергией объекта за счет емкости аккумуляторных батарей на семь дней</p>			
Стоимость панелей, руб	2 150 000	1 080 000	1 345 000
Срок службы солнечных панелей, год	10	25	25
Стоимость аккумуляторов, руб	475 000	475 000	475 000
Срок службы аккумуляторов, год	10	10	10
Амортизация за 25 лет, руб	6 562 500	2 270 000	2 535 000
Кол-во произведенной энергии, МДж	1 322 000	1 322 000	1 322 000
Кол-во потребленной энергии, МДж	378 000	378 000	378 000
Кол-во избыточной энергии сгенерированной СФЭУ, МДж	944 000	944 000	944 000
Стоимость электроэнергии приведенная к потреблению, руб/МДж (руб/кВт*ч)	17,36 (62,5)	6,0 (21,6)	6,7 (24,1)
Стоимость электроэнергии приведенная к	5,0	1,7	1,9

произведенной, руб/МДж (руб/кВт*ч)	(17,8)	(6,2)	(6,9)
Петрозаводск			
Стоимость панелей, руб	10 080 000	5 040 000	6 300 000
Срок службы солнечных панелей, год	10	25	25
Стоимость аккумуляторов, руб	1 285 200	1 285 200	1 285 200
Срок службы аккумуляторов, год	10	10	10
Амортизация за 25 лет, руб	28 400 000	8 253 000	9 513 000
Кол-во произведенной энергии, МДж	3 770 000	3 770 000	3 770 000
Кол-во потребленной энергии, МДж	378 000	378 000	378 000
Кол-во избыточной энергии сгенерирован- ной СФЭУ, МДж	3 392 000	3 392 000	3 392 000
Стоимость электроэнергии приведенная к потреблению, руб/МДж (руб/кВт*ч)	75,1 (270)	21,8 (78,6)	25,2 (90,6)
Стоимость электроэнергии приведенная к произведенной, руб/МДж (руб/кВт*ч)	7,5 (27,1)	2,2 (7,9)	2,5 (9,1)

Вывод.

На основании полученных данных можно утверждать, что обеспечение объектов электроэнергией посредством СФЭУ в качестве единственного источника электроэнергии является нецелесообразным, в виду того, что стоимость производства электроэнергии даже в случае с южными регионами превышает стоимость электроэнергии полученной традиционными методами.

В тоже время необходимо отметить, что при наличии гарантированного спроса на избыточную электроэнергию, сгенерированную в течение летнего периода, себестоимость ее генерации превышает тариф не более чем вдвое и уменьшается пропорционально отношению количества вырабатываемой энергии к величине характеризующей ее накопление. Следовательно, при снижении в перспективе стоимости солнечных элементов и аккумуляторных батарей данный метод генерации становится рентабельным в качестве источника сопутствующего традиционным источникам энергии при подключении к глобальной распределительной сети.

При прямой передаче энергии в сеть, без необходимости ее накопления, в южных регионах Российской федерации можно добиться стоимости электроэнергии, приведенной к годовому циклу, в пределах 3,5 руб/кВт*ч.