

**ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МАГИСТРАТУРА**

**Кафедра: «Электроэнергетики»**

**Р.Ж. Альназаров**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
АВТОНОМНОЙ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

**6N0718 «Электроэнергетика»**

**Реферат к диссертации на соискание академической степени Магистр**

**Павлодар – 2010**

## **Актуальность и перспективы солнечной энергетики.**

Солнце является практически неисчерпаемым, абсолютно безопасным, в равной степени всем принадлежащим и доступным источником энергии. Полное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли за год, не только во много раз превышает энергию мировых запасов нефти, газа, угля, урана и других энергетических ресурсов, но почти в десять тысяч раз больше современного энергопотребления. В настоящее время все больше стран планируют в своих энергетических программах крупномасштабное использование солнечной энергии.

Согласно прогнозу установленная мощность ФЭ должна вырасти к 2030 г. почти на два порядка и составить 1000 млрд. ватт. Такое беспрецедентное увеличение обусловлено, во-первых, принятием развитыми странами национальных программ с ясно выраженной практической направленностью: более 100 тысяч солнечных крыш в Германии и 200 тысяч солнечных крыш в Японии, 1 млн. солнечных крыш в США и, во-вторых, государственной поддержкой. При реализации этих проектов значительная часть стоимости установок оплачивается из государственных бюджетов, причем государство выкупает энергию, производимую солнечными батареями, по цене, в 10 раз превышающей рыночную, а также предлагает налоговые льготы и субсидии производителям солнечных батарей, монтируемых на крышах различных сооружений.

Осуществление этих программ позволяет создать устойчивый рынок для использования солнечной энергии на сооружениях и выявить как наиболее успешные схемы государственной помощи потребителям и производителям этих систем, так и совершенные технологические фотоэлектрические системы, которые уже стали прототипами промышленных разработок. Все это привело к тому, что в настоящее время в Германии надежные солнечные батареи могут быть установлены где угодно и в течение нескольких дней, а реализация вышеупомянутой программы в США позволит снизить выделение двуокиси углерода в эквиваленте выделений от 850 тыс. автомобилей. Кроме того уже существуют проекты домов, обеспечивающих себя электричеством за счет солнечных батарей, теплом – за счет солнечных коллекторов и оборудованных современными средствами экономии тепла и электричества.

Другим не менее важным обстоятельством является возможность снабжения электричеством населенных пунктов, расположенных в солнечных районах, но не имеющих доступа к централизованному снабжению. Людей, проживающих в таких регионах, насчитывается в мире более двух миллиардов. Солнечная энергия могла бы стать доминирующим децентрализованным источником энергии и для многих отдаленных районов Казахстана.

**Объектом исследования** являются автономные фотопреобразовательные панели «SW 155 mono».

**Предметом исследования** является математическая модель автономной фотопреобразовательной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33».

**Идея работы** – замещение традиционных энергоресурсов энергией солнца, получение экспериментальным методом среднегодовых сумм солнечной радиации Вт/м<sup>2</sup>, потенциал солнечной радиации для конкретной местности. Без учета местных метеорологических условий невозможно рассчитать необходимую вырабатываемую мощность фотопреобразовательной системы для оптимального питания потребителей районов децентрализованного электроснабжения.

**Целью работы** является разработка методики обоснования параметров систем автономного электроснабжения на базе солнечных фотоэлектрических установок, построение математических моделей, использование которых позволит проанализировать выходные характеристики при изменении параметров солнечного излучения. Для достижения этой цели в работе ставились и решались следующие взаимосвязанные задачи:

1. Расчет эффективного значения плотности потока солнечного излучения;
2. предложена математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную приемную площадку фотоэлектрической установки, учитывающая зависимость КПД солнечного элемента от изменения параметров солнечного излучения;
3. моделирование солнечной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33»;
4. экспериментальное использование солнечной панели «SW 155 mono» в г. Павлодар;
5. анализ работы солнечной панели «SW 155 mono» в климатических условиях г. Павлодар.

**Методы исследования.** В процессе выполнения исследований применялись: научно-техническое обобщение литературных источников по исходным предпосылкам исследований ученых: В.И.Виссарионова, Г.В.Дерюгина, В.А.Кузнецова, Г.М. Раушенбаха, А.М. Магамедова, Ю.М. Кушнера, Л.Д. Ландау, В.Е. Лашкарева и В.М. Тучкевича, Ж.И. Алферова и др. Одним из первых, кто поставил проблему преобразования световой энергии в электрическую с помощью полупроводников был А.Ф. Иоффе.

Практически все разработанные сегодня в мире методы расчета ресурсов солнечной радиации измеряет, как правило, приход солнечной радиации на неподвижную горизонтальную приемную площадку и принимается в качестве количественной меры оценки ресурсов солнечной радиации. Далее полученные данные для горизонтальной приемной площадки пересчитываются по эмпирическим формулам.

Под валовым потенциалом солнечной энергии в заданной точке земной поверхности понимается среднегодовое значение солнечной энергии, поступающей на горизонтальную приемную площадку площадью в 1 м<sup>2</sup> за период равный одному календарному году.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждаются: корректностью методик постановки эксперимента, проведением экспериментов и численных расчетов с многократными наблюдениями. Полученные результаты не противоречат существующим доказательствам.

**На защиту выносятся:**

1. Актуальность и перспективы солнечной энергетики как источника электроэнергии для автономных потребителей;
2. Математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную приемную площадку;
3. Экспериментальное использование солнечной панели «SW 155 mono» в г. Павлодар
4. Моделирование солнечной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33».

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Определены статистические характеристики, математические зависимости и оценен потенциальный ресурс солнечной энергии в г. Павлодар;
2. разработана методика, позволяющая более точно рассчитывать поступление солнечного излучения на различно ориентированные поверхности фотоэлектрических установок;
3. Построена математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации на солнечную панель «SW 155 mono».

**Практическая значимость работы** заключается в том, что определена полезная удельная солнечная энергия, разработаны инженерные методики оценки энергетических характеристик солнечных фотоэлектрических установок на территории г. Павлодар. Построенная математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации облегчает определение количества солнечной радиации для конкретной местности.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на X Республиканская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых преподавателей: «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана», секция «Энергетика и энергосбережение» (Казахстан, г. Усть-Каменогорск, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, апрель 2010 г.).

**Публикации.** Материалы, отражающие основное содержание работы изложены в 3 опубликованных статьях на научно-технических конференциях. 2 статьи в сборнике материалов научно-технической конференции «Творчество молодых - инновационному развитию Казахстана» в Восточно-Казахстанском государственном техническом университете им. Д. Серикбаева.

3 статья опубликована в сборнике материалов конференции «Второй республиканский конкурс проектов по энергосбережению и альтернативным источникам энергии среди учащихся, студентов, молодых специалистов и ученых».

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемых источников из 40 наименований. Диссертационная работа содержит 71 страницы машинописного текста, включает 11 таблиц и 42 иллюстрации.

### Краткое содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность и поставлена цель работы, определены основные задачи исследования, отражены научная новизна полученных результатов, их практическая ценность и апробация.

**В первой главе** описываются солнечная радиация, полная мощность солнечного излучения равная  $4 \cdot 10^{26}$  Вт. Эффективная солнечная постоянная  $I_{0 \text{ эф}}$  учитывающая эти сезонные колебания, может быть рассчитана по формуле:

$$I_{0 \text{ эф}} = I_0 \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360^\circ \cdot n}{365}\right) \right], \quad (1)$$

Солнечный спектр состоит из:

- ультрафиолетовых волн длиной 0,28...0,38 мкм, невидимых для наших глаз и составляющих приблизительно 2 % солнечного спектра;
- видимая часть спектра световых волн в диапазоне 0,38 ... 0,78 мкм, составляющих приблизительно 49 % спектра;
- инфракрасных волн длиной 0,78...3,0 мкм, на долю которых приходится большая часть оставшихся 49 % солнечного спектра.

Угол падения солнечных лучей  $\theta$  на рассматриваемую плоскость в заданный момент времени может быть вычислен с помощью следующего соотношения:

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – широта местности;

$\delta$  – склонение (угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора),  $\delta = 23,45 \cdot \sin(360 \cdot \frac{284+n}{365})$ ;

$\beta$  – угол между рассматриваемой плоскостью и горизонтальной плоскостью;

$\gamma$  – азимутальный угол (угол между проекцией нормали к рассматриваемой плоскости и местным меридианом);

$\omega$  – часовой угол (отсчитанный от солнечного полдня, угловое смещение Солнца относительно местного меридиана, обусловленное вращением Земли и соответствующее  $15^\circ$  в час).

Рассматривается потенциал и перспективы использования солнечной энергии в Республике Казахстан. Территория Казахстана расположена между  $40$  и  $50^\circ$  северной широты  $70$  и  $80^\circ$  восточной долготы. Приход суммарной солнечной радиации находится на уровне  $1227 - 1523,2$  кВт·ч/м<sup>2</sup> при общем увеличении с Севера на Юг. Больше всего количества солнечной энергии на территории Казахстана в г. Кызылорда –  $1523,2$  кВт·ч/м<sup>2</sup>, само мало в г. Кокшетау –  $1227$  кВт·ч/м<sup>2</sup>, в г. Павлодаре –  $1306,6$  кВт·ч/м<sup>2</sup>. Годовое число часов солнечного сияния для г. Павлодар  $4395,67$  ч. Это число было подсчитано с помощью программы «Солнечный калькулятор». В остальной части Казахстана число часов солнечного сияния составляет  $\pm 10\%$ . Наиболее солнечные месяцы: май – август, меньше всего солнца в ноябре: январе – феврале.

**Во второй главе** описываются электрофизические и оптические свойства кремниевых фотоэлектрических преобразователей.

Рассмотрен полупроводниковый кристалл, содержащий р-п-переход, схематически показанный на рис. 1.

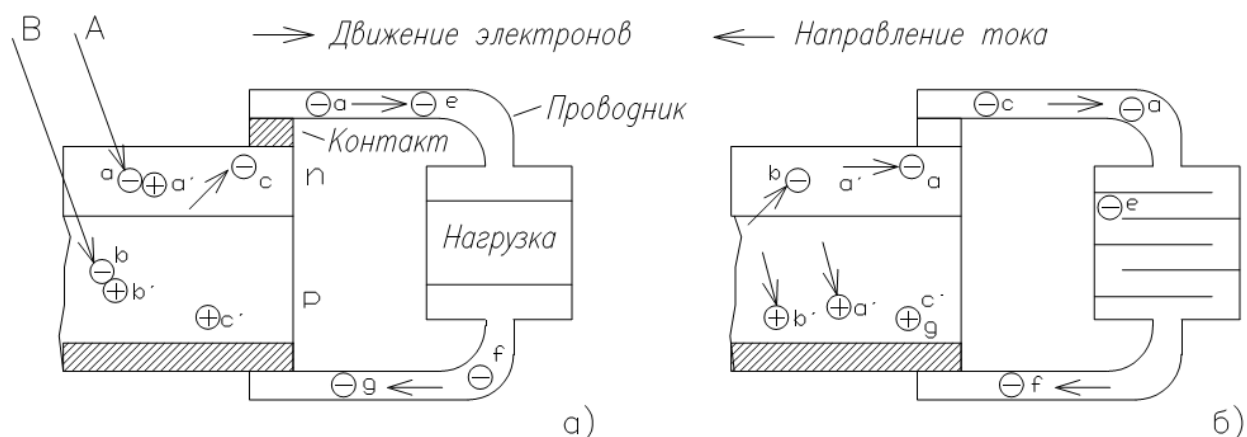


Рисунок 1 – Генерирование электрического тока солнечным элементом (элемент дан в разрезе):

а) – фотоны А и В образовали электронно-дырочные пары  $aa'$  и  $bb'$ . Электрон  $c$  и дырка  $c'$ , образованные предыдущим фотоном, движутся к контактам солнечного элемента. Электроны  $d, e, f$  и  $g$  перемещаются по внешней цепи, образуя электрический ток;

б) – дырка, образованная фотоном А, прошла через переход и направляется к положительному контакту. Электрон, образованный фотоном В, также прошел через переход и движется к отрицательному контакту. Электрон g перешел из полупроводника в проводник. Электрон g перешел в полупроводник и рекомбинировал с дыркой с'.

Установившаяся контактная разность потенциалов определяется как

$$v_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{p_n} = \frac{\Delta \epsilon_0}{e} - \frac{kT}{e} \ln \frac{v_n v_p}{N_n N_d}, \quad (3)$$

где  $n_p, n_n$  - концентрация электронов;

$p_p, p_n$  - концентрация дырок в материалах n и p-типа;

$\Delta \epsilon_0$  - ширина запрещенной зоны вещества;

$v_n = 2(2\pi m_n \cdot KT)^{\frac{3}{2}} h^3, \quad v_p = 2(2\pi m_p \cdot KT)^{\frac{3}{2}} h^3$  - эффективная плотность состояний электронов и дырок в зоне проводимости (валентной зоне);

$N_a, N_d$  - концентрация акцепторов и доноров;

$T$  - температура полупроводника.

Уравнение вольт-амперной характеристики (ВАХ) p-n перехода в этом случае имеет вид:

$$I = I_s (2e^{\frac{eU}{kT}} - 1), \quad (3)$$

где  $U$  - внешнее напряжение, приложенное к p-n переходу, с учетом знака;  $I_s$  - значение, к которому стремится обратный ток при увеличении обратного напряжения.

Поскольку направление фото-ЭДС и контактной разности потенциалов противоположно, ток  $I_n$  во внешней цепи будет равен:

$$I_n = I_{св} - I_{нас} (e^{\frac{eU_\phi}{kT}} - 1), \quad (4)$$

где  $I_{нас} = I_c$  - ток неосновных носителей, проходящих через неосвещенный p-n переход, равный току насыщения;  $U_\phi$  - напряжение на зажимах фотоэлемента при включении нагрузки во внешнюю цепь.

Это уравнение представляет собой ВАХ ФЭП.  $U_\phi$  Значение равно:

$$U_\phi = \frac{KT}{e} \ln \left( \frac{I_{с.в} - I_n}{I_{н.ас}} + 1 \right), \quad (5)$$

Для разомкнутой цепи  $I_n = 0$ , откуда ЭДС фотоэлемента

$$E_\phi = \frac{KT}{e} \ln \left( \frac{I_{с.в} - I_n}{I_{н.ас}} + 1 \right), \quad (6)$$

Максимальное значение  $eE_\phi$  не может быть больше  $\Delta\varepsilon_0$ . Значение генерируемого светом тока короткого замыкания  $I_{к.з.} = I_{св}$  определяется формулой:

$$I_{св} = I_{к.з.} = e \cdot \int_{\Delta\varepsilon_0 = h\nu}^{\infty} Q_T(h\nu) \cdot N_\phi(h\nu) d(h\nu), \quad (7)$$

где  $Q_T(h\nu)$  - коэффициент собирания неосновных носителей (или абсолютная спектральная чувствительность элемента), который согласно определению показывает, какая часть носителей, генерированных при поглощении фотонов с энергией  $h\nu$ , дает вклад в  $I_{к.з.}$ ,  $N_\phi(h\nu)$  - плотность потока фотонов с энергией  $h\nu$ , падающих на ФЭП.

По ВАХ можно определить значения напряжения  $U_m$  и тока  $I_m$ , соответствующие режиму максимальной мощности:

$$\left(1 + \frac{U_m}{KT}\right) e^{\frac{eU}{KT}} = e^{\frac{eE_\phi}{KT}}, \quad (8)$$

$$I_m = I_{св} - I_{нас} \left( e^{\frac{eU_m}{KT}} - 1 \right) = I_{св} \left( 1 + \frac{I_{нас}}{I_{св}} \right) \cdot \frac{eU_m}{kT + eU_m}, \quad (9)$$

Максимальный КПД, т.е. КПД при согласованной нагрузке, представляется выражением:

$$\eta_{\max} = \frac{I_m U_m}{N_{\text{подв}}} = \frac{e I_{св} U_m^2}{(kT + eU_m) N_{\text{подв}}} = k \frac{I_{св} E}{N_{\text{подв}}}, \quad (10)$$

где  $k$  - коэффициент заполнения, который определяет степень приближения ВАХ к прямоугольной форме. При  $\frac{I_{св}}{I_{нас}} < 10^4$ ,  $K \leq 0,72$ , т.е.

$$\eta_{\max} = 0,72 \frac{I_{св} E}{N_{\text{подв}}}.$$

**В третьей главе** описывается математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную приемную площадку. Падающий на поверхность Земли суммарный поток СИ  $R_\Sigma(t)$

$$R_\Sigma(t) = R_{np}(t) + R_o(t) + R_{om}(t), \quad (11)$$

где  $R_{np}(t)$  - прямое СИ, реализуемое в виде направленного потока СИ вдоль прямой линии, связывающей собой Солнце и приемную площадку СИ на земле;

$R_o(t)$  - диффузное СИ, реализуемое за счет направленного СИ, рассеянного в атмосфере земли облаками, а аэрозолями, пылью и т.д.;

$R_{om}(t)$  - отраженная от поверхности земли часть направленного СИ.

Суммарный поток СИ  $R_{\Sigma}(t)$  зависит от многих факторов, в первую очередь, от геометрического расположения приемной площадки относительно Солнца. Для пояснения сказанного на рис. 2 представлена произвольно-ориентированная наклоненная к югу плоская приемная площадка. Основные обозначения на рис. 2:  $S$  – горизонтальная площадка на земле где расположена произвольно-ориентированная плоская приемная площадка  $F$ , наклоненная к Югу под углом  $\beta^0$ ,  $OO$  - линия пересечения плоскостей  $F$  и  $S$ ;  $AD \in S$  и  $AD \perp OO$ ;  $AC \in F$  и  $AC \perp OO$ ;  $AE \perp F$ ;  $AB \in S$ ;  $G$  - солнце;  $AH \in S$  и  $AH$  является проекцией  $AG$  на  $S$ .

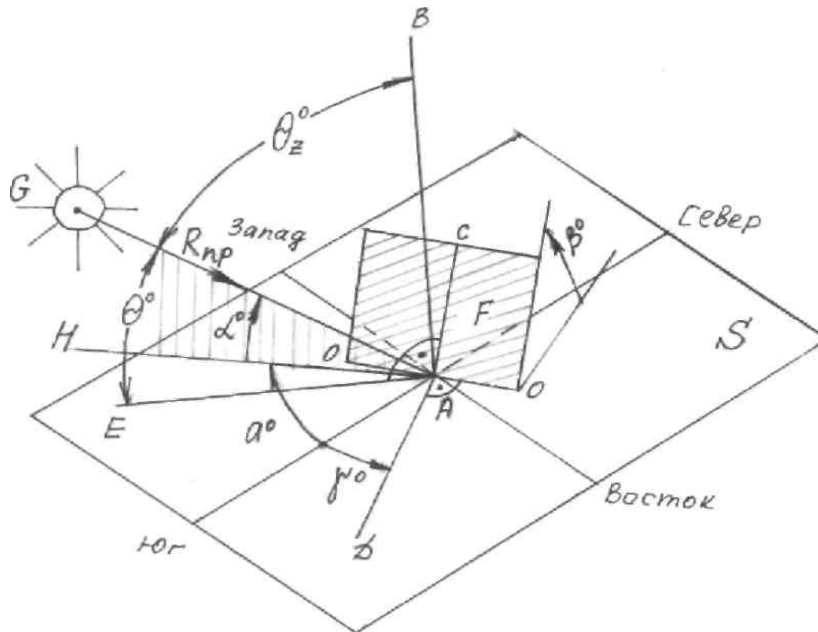


Рисунок 2 – Геометрия приемной площадке на Земле и Солнца

$\theta^0$  – угол падения солнца, равный углу между  $GA$  и перпендикуляром к  $F$ , т.е. угол между направлением на Юг и перпендикуляром  $AD$  к  $OO$  ( $\gamma^0 = 0$  для площадки, ориентированной строго на Юг;  $\gamma^0 < 0$ , т.е.  $-90 < \gamma^0 < 0$ ) для площадки, ориентированной к западу;  $\alpha^0$  – высота солнца над горизонтом или угол между направлением  $GA$  и его проекцией на плоскость (т.е.  $HA$ );  $a^0$  – азимут солнца или угол между направлением на Юг и проекцией  $GA$  и плоскостью  $S$  (т.е.  $HA$ ); знаки  $a^0$  и  $\gamma^0$  совпадают между собой.

Для максимизации прихода прямого СИ на ПП необходимо, чтобы угол падения Солнца  $\theta^0$  был равен  $90^0$ .

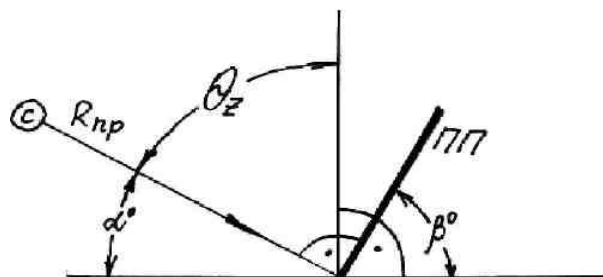


Рисунок 3 – Оптимальная ориентация приемной площадки к прямому СИ

Поток прямой солнечной радиации на произвольно ориентированную наклонную поверхность определяется формулой:

$$S_s = S_m \cos i, \quad (36)$$

$$\cos i = \cos \alpha \sin h_C + \sin \alpha \cos h_C \cos \psi, \quad (37)$$

где  $S_m$  – поток прямой солнечной радиации у земной поверхности, приходящий на перпендикулярную к лучам поверхность  $1353 \text{ Вт/м}^2 \pm 1,5 \%$ ;  $\cos i$  – косинус угла падения солнечных лучей на заданную поверхность;  $\alpha$  – угол наклона поверхности по отношению к горизонтальной плоскости;  $h_C$  – высота Солнца;

$\psi = \psi_C - \psi_S$ ;  $\psi_C$  – азимут Солнца;  $\psi_S$  – азимут проекции нормали к поверхности на горизонтальную плоскость, азимуты отсчитываются от плоскости меридиана, положительны при отсчете от точки юга в направлении часовой стрелки.

В пункте 3.3 проект «Комбинированная система электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии» подсчитано для лаборатории «Возобновляемая энергетика» с потреблением электроэнергии  $47,482 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  в день, необходимую мощность могут обеспечить:

- 10 солнечных панелей, номинальной мощностью 155 Вт каждая и суммарной площадью  $12,88 \text{ кв.м.}$ ;

- ветрогенератор номинальной мощностью 1 кВт при скорости ветра  $12,5 \text{ м/с}$ . В целях достижения надежного бесперебойного электроснабжения лаборатории предусмотрен резерв, представляющий собой электрическую сеть, вводимый в действие устройством автоматического включения резерва – АВР.

Стоимость проекта составляет 1 907 950 тенге.

В пункте 3.4 посчитано, что от солнечной панели «SW 155 mono» в г. Павлодар можно получить мощность: с марта по октябрь от  $2,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  до  $7,51 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  в день. В осенне-зимние месяцы с ноября по февраль отдаваемая мощность низкая в пределах от  $0,79$  до  $1,78 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  в день (см. рис.4).

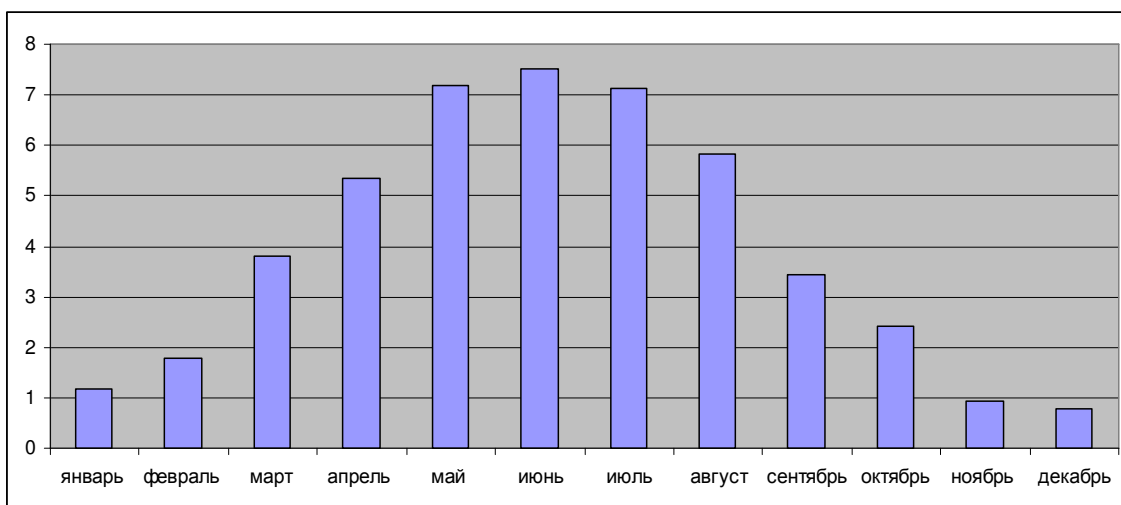


Рисунок 4 – Средняя вырабатываемая мощность кВт·ч в течении месяца

Моделирование солнечной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33». С помощью программы «PVSYST 4.33» была построена ВАХ солнечной панели «SW 155 mono», производства фирмы «Solar World» (см. рис. 5). Программа автоматически считает номинальную мощность, актуальную мощность, потери мощности и результирующую ВАХ.

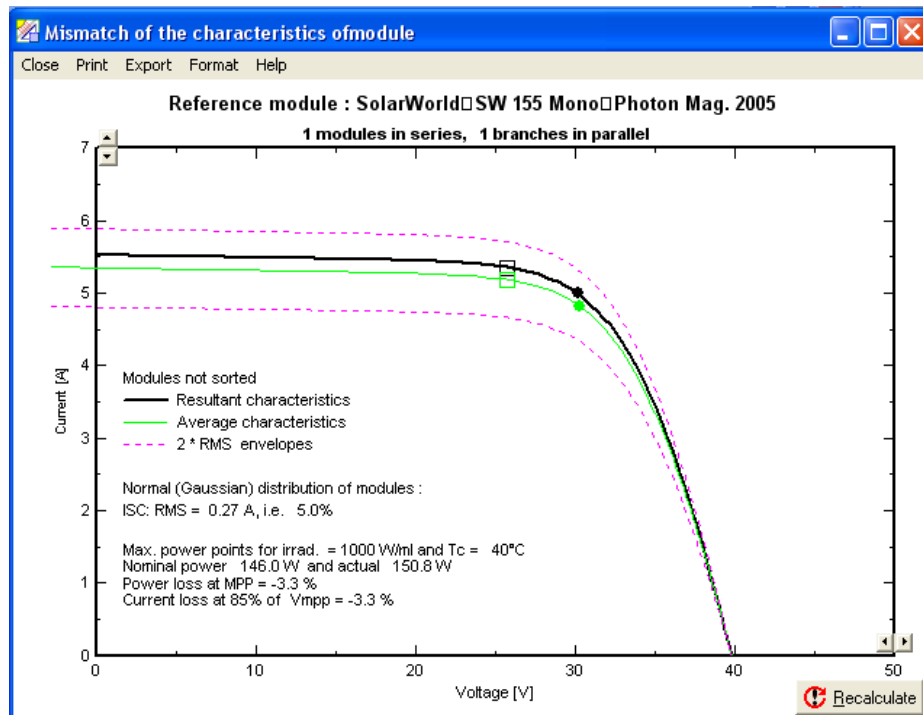


Рисунок 5 – ВАХ солнечной панели «SW 155 mono» при 1000 Вт/м<sup>2</sup>

В программе «PVSYST 4.33» исследуем приход солнечной радиации к различно ориентированной относительно солнца солнечной панели «SW 155 mono». При горизонтальном угле наклона 0°, под углом 45° и при вертикальном угле 90°.

Вывод: при фиксированном угле наклона в 45° к горизонту среднегодовая выходная мощность – 197 кВт·ч, при горизонтальном размещении 0° – 163 кВт·ч, при вертикальном размещении солнечной панели 90° – 143 кВт·ч.

**В заключении** приведены основные результаты выполненных исследований и выводы по работе:

1. изложена модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную произвольно ориентированную поверхность;
2. разработана комбинированная система автономного электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии;
3. экспериментальное использование солнечной панели «SW 155 mono» в г. Павлодар;
4. моделирование солнечной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33»;
5. рассчитано возможное электроснабжение ИнЕУ с помощью станции фотопреобразовательной системы – 31 280 Ватт.

## **Список публикаций по теме диссертации**

1. Е.В. Зигангирова, Д.В. Мосиящ, Р.Ж. Альназаров. «Определение солнечного потенциала для северных регионов Казахстана» // Материалы X Республиканской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых преподавателей: «Творчество молодых - инновационному развитию Казахстана», секция «Энергетика и Энергосбережение», г.Усть-Каменогорск.

2. А.С. Ермензин, Р.Ж. Альназаров. «Электроснабжение на основе возобновляемых источников энергии» // Материалы X Республиканской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых преподавателей: «Творчество молодых -инновационному развитию Казахстана», секция «Энергетика и Энергосбережение», г.Усть-Каменогорск.

3. Д.В. Мосиящ, А.С. Ермензин и Р.Ж. Альназаров. «Гибридная система электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии» // Сборник с материалами участников второго республиканского конкурса проектов по энергосбережению и альтернативным источникам энергии среди учащихся, студентов, молодых специалистов и ученых, номинация «Молодые ученые».

## ВВЕДЕНИЕ

Из всех видов возобновляемых источников энергии в наибольших масштабах используется солнечная энергия. Еще недавно фотоэлектрические солнечные батареи из-за высокой стоимости применялись лишь в отдельных случаях, например в космонавтике, и имели очень небольшую мощность, измеряемую сотнями ватт. Но стабильный рост цен практически на все энергоносители и постепенное истощение запасов исчерпаемых источников (нефть, газ, уголь) все чаще вынуждают задуматься о возобновляемых источниках, дающих альтернативные виды энергии. Производство фотоэлектрических преобразователей на мировом рынке за период с 1988 по 2010 годы возросло более чем в восемь раз. Общая площадь гелиоэнергетических установок в мире превышает 120 млн. м<sup>2</sup>.

В фотовольтаическом методе получения электричества нет механических перемещений деталей конструкции. Он основан на свойствах полупроводниковых материалов и их взаимодействии со светом. Свободные носители образуются в результате взаимодействия полупроводника со светом, а разделяются под действием электрического поля, возникающего внутри элемента. До недавнего времени практически все фотоэлементы изготавливались из кристаллического кремния, однако сейчас все более широкое применение находят и другие материалы.

Фотоэлектрическая энергетика ФЭ стала конкурентоспособной во всех сегментах рынка, в частности в области решения прикладных задач в рамках энергосистемы, поскольку приток инвестиций в этот сектор позволил добиться значительных успехов в сфере автоматизации, повышении эффективности производства и суммарной выработки электроэнергии. Несколько ведущих стран — Германия, Япония и Соединенные Штаты, на которые приходится две трети мирового рынка электроэнергии, — осуществляют программы поддержки рынка с целью снижения затрат.

По мере роста доступности и распространенности фотоэлектрической технологии увеличивается и ее потенциал как важного источника энергии с низкой углеродной составляющей.

**Актуальность и перспективы солнечной энергетики.** Солнце является практически неисчерпаемым, абсолютно безопасным, в равной степени всем принадлежащим и доступным источником энергии. Полное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли за год, не только во много раз превышает энергию мировых запасов нефти, газа, угля, урана и других энергетических ресурсов, но почти в десять тысяч раз больше современного энергопотребления. В настоящее время все больше стран планируют в своих энергетических программах крупномасштабное использование солнечной энергии.

Согласно прогнозу установленная мощность ФЭ должна вырасти к 2030 г. почти на два порядка и составить 1000 млрд. ватт. Такое беспрецедентное

увеличение обусловлено, во-первых, принятием развитыми странами национальных программ с ясно выраженной практической направленностью: более 100 тысяч солнечных крыш в Германии и 200 тысяч солнечных крыш в Японии, 1 млн. солнечных крыш в США и, во-вторых, государственной поддержкой. При реализации этих проектов значительная часть стоимости установок оплачивается из государственных бюджетов, причем государство выкупает энергию, производимую солнечными батареями, по цене, в 10 раз превышающей рыночную, а также предлагает налоговые льготы и субсидии производителям солнечных батарей, монтируемых на крышах различных сооружений.

Осуществление этих программ позволяет создать устойчивый рынок для использования солнечной энергии на сооружениях и выявить как наиболее успешные схемы государственной помощи потребителям и производителям этих систем, так и совершенные технологические фотоэлектрические системы, которые уже стали прототипами промышленных разработок. Все это привело к тому, что в настоящее время в Германии надежные солнечные батареи могут быть установлены где угодно и в течение нескольких дней, а реализация вышеупомянутой программы в США позволит снизить выделение двуокси углерода в эквиваленте выделений от 850 тыс. автомобилей. Кроме того уже существуют проекты домов, обеспечивающих себя электричеством за счет солнечных батарей, теплом – за счет солнечных коллекторов и оборудованных современными средствами экономии тепла и электричества.

Другим не менее важным обстоятельством является возможность снабжения электричеством населенных пунктов, расположенных в солнечных районах, но не имеющих доступа к централизованному снабжению. Людей, проживающих в таких регионах, насчитывается в мире более двух миллиардов. Солнечная энергия могла бы стать доминирующим децентрализованным источником энергии и для многих отдаленных районов Казахстана.

**Объектом исследования** являются автономные фотопреобразовательные панели «SW 155 mono».

**Предметом исследования** является математическая модель автономной фотопреобразовательной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33».

**Идея работы** – замещение традиционных энергоресурсов энергией солнца, получение экспериментальным методом среднегодовых сумм солнечной радиации  $\text{Вт/м}^2$ , потенциал солнечной радиации для конкретной местности. Без учета местных метеорологических условий невозможно рассчитать необходимую вырабатываемую мощность фотопреобразовательной системы для оптимального питания потребителей районов децентрализованного электроснабжения.

**Целью работы** является разработка методики обоснования параметров систем автономного электроснабжения на базе солнечных фотоэлектрических установок, построение математических моделей,

использование которых позволит проанализировать выходные характеристики при изменении параметров солнечного излучения. Для достижения этой цели в работе ставились и решались следующие взаимосвязанные задачи:

1. расчет эффективного значения плотности потока солнечного излучения;
2. предложена математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную приемную площадку фотоэлектрической установки, учитывающая зависимость КПД солнечного элемента от изменения параметров солнечного излучения;
3. моделирование солнечной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33»;
4. экспериментальное использование солнечной панели «SW 155 mono» в г. Павлодар;
5. анализ работы солнечной панели «SW 155 mono» в климатических условиях г. Павлодар.

**Методы исследования.** В процессе выполнения исследований применялись: научно-техническое обобщение литературных источников по исходным предпосылкам исследований ученых: В.И.Виссарионова, Г.В.Дерюгина, В.А.Кузнецова, Г.М. Раушенбаха, А.М. Магамедова, Ю.М. Кушнина, Л.Д. Ландау, В.Е. Лашкарева и В.М. Тучкевича, Ж.И. Алферова и др. Одним из первых, кто поставил проблему преобразования световой энергии в электрическую с помощью полупроводников был А.Ф. Иоффе.

Практически все разработанные сегодня в мире методы расчета ресурсов солнечной радиации измеряют, как правило, приход солнечной радиации на неподвижную горизонтальную приемную площадку и принимается в качестве количественной меры оценки ресурсов солнечной радиации. Далее полученные данные для горизонтальной приемной площадки пересчитываются по эмпирическим формулам.

Под валовым потенциалом солнечной энергии в заданной точке земной поверхности понимается среднегоголетняя величина солнечной энергии, поступающей на горизонтальную приемную площадку площадью в 1 м за период равный одному календарному году.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждаются: корректностью методик постановки эксперимента, проведением экспериментов и численных расчетов с многократными наблюдениями. Полученные результаты не противоречат существующим доказательствам.

**На защиту выносятся:**

1. актуальность и перспективы солнечной энергетики как источника электроэнергии для автономных потребителей;

2. Математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную приемную площадку;
3. Экспериментальное использование солнечной панели «SW 155 mono» в г. Павлодар
4. Моделирование солнечной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33».

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Определены статистические характеристики, математические зависимости и оценен потенциальный ресурс солнечной энергии в г. Павлодар;
2. разработана методика, позволяющая более точно рассчитывать поступление солнечного излучения на различно ориентированные поверхности фотоэлектрических установок;
3. Построена математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации на солнечную панель «SW 155 mono».

**Практическая значимость работы** заключается в том, что определена полезная удельная солнечная энергия, разработаны инженерные методики оценки энергетических характеристик солнечных фотоэлектрических установок на территории г. Павлодар. Построенная математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации облегчает определение количества солнечной радиации для конкретной местности.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на X Республиканская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых преподавателей: «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана», секция «Энергетика и энергосбережение» (Казахстан, г. Усть-Каменогорск, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, апрель 2010 г).

**Публикации.** Материалы, отражающие основное содержание работы изложены в 3 опубликованных статьях на научно-технических конференциях. 2 статьи в сборнике материалов научно-технической конференции «Творчество молодых - инновационному развитию Казахстана» в Восточно-Казахстанском государственном техническом университете им. Д. Серикбаева.

3 статья опубликована в сборнике материалов конференции «Второй республиканский конкурс проектов по энергосбережению и альтернативным источникам энергии среди учащихся, студентов, молодых специалистов и ученых».

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемых источников из 40 наименований. Диссертационная работа содержит 78 страницы машинописного текста, включает 13 таблиц и 44 иллюстрации.

# 1 СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

## 1.1 Солнечная радиация

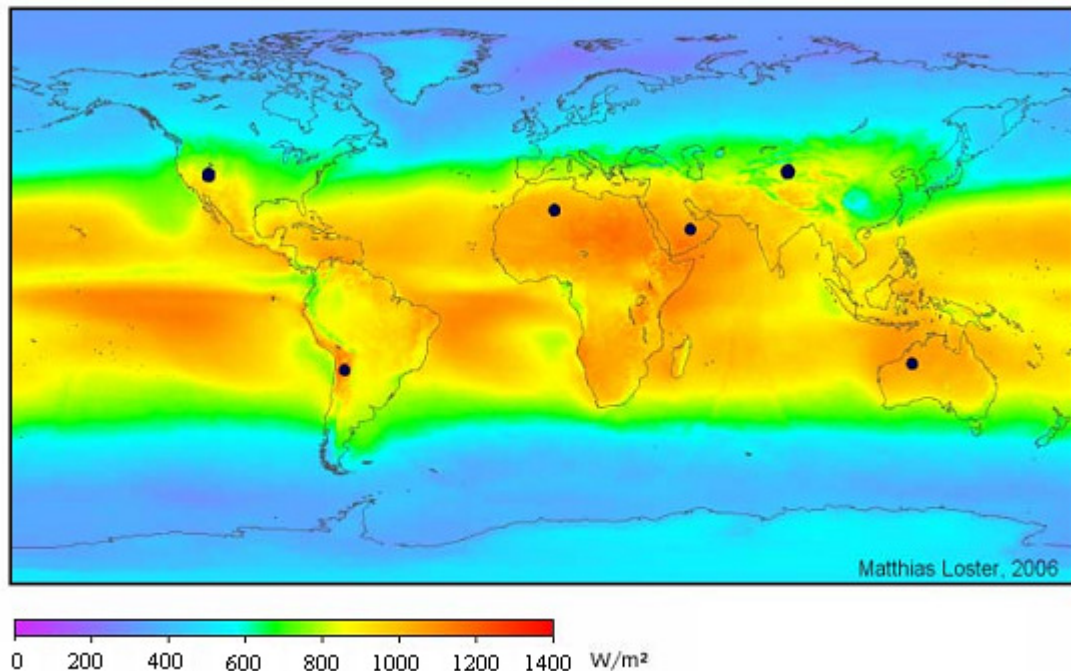


Рисунок 1 – Карта солнечного излучения

Солнце - самый мощный источник энергии по сравнению со всеми другими, доступными человеку. Полная мощность солнечного излучения выражается огромной цифрой:  $4 \cdot 10^{26}$  Вт. Эта цифра настолько велика, что трудно выбрать для сопоставления с ней какую-либо подходящую величину, привычную для нас в наших земных масштабах. Даже вблизи Земли, на расстоянии около 150 млн. км от Солнца, на каждый квадратный метр поверхности, расположенной перпендикулярно солнечным лучам, приходится в среднем 1,4 кВт лучистой энергии.

Радиус Земли равен 6370 км, а поперечное сечение Земли составляет  $127,6 \times 10^6$  км<sup>2</sup>. Легко подсчитать, что полная мощность солнечной радиации, поступающей на Землю, равна  $178,6 \cdot 10^{12}$  кВт. Из этого следует, что в течение года на Землю в виде лучистой энергии передается  $1,56 \cdot 10^{18}$  кВт·ч.

Количество лучистой энергии Солнца во всем диапазоне длин волн, получаемой в единицу времени единичной площадкой, перпендикулярной солнечным лучам, вне земной атмосферы на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца, называется солнечной постоянной. Значение солнечной постоянной, полученное в результате прямых измерений с космических аппаратов и рекомендованное NASA в качестве стандартной:

$$I_0 = 1353 \text{ Вт/м}^2 \pm 1,5 \text{ \%}.$$

Это значение используется до настоящего времени в гелиотехнике. Поскольку расстояние между Землей и Солнцем претерпевает сезонные изменения, интенсивность солнечной радиации, падающей на единичную площадку, также не остается постоянной. Эффективная солнечная постоянная  $I_{0\text{эф}}$  учитывающая эти сезонные колебания, может быть рассчитана по формуле:

$$I_{0\text{эф}} = I_0 \left[ 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360^\circ \cdot n}{365}\right) \right], \quad (1)$$

где  $n$  – порядковый номер дня, отсчитанный от 1 января.

Солнечная радиация – это электромагнитное излучение, сосредоточенное в основном в диапазоне волн длиной 0,28...3,0 мкм (см. рис. 2).

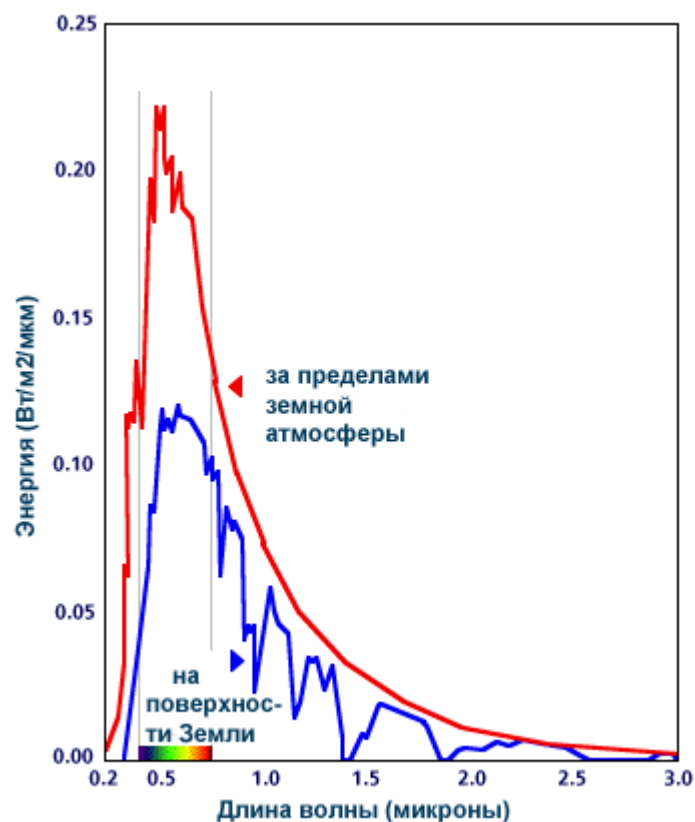


Рисунок 2 – Спектральное распределение энергии солнечного излучения

Солнечный спектр состоит из:

- ультрафиолетовых волн длиной 0,28...0,38 мкм, невидимых для наших глаз и составляющих приблизительно 2 % солнечного спектра;
- видимая часть спектра световых волн в диапазоне 0,38 ... 0,78 мкм, составляющих приблизительно 49 % спектра;
- инфракрасных волн длиной 0,78...3,0 мкм, на долю которых приходится большая часть оставшихся 49 % солнечного спектра.

Остальные части спектра играют незначительную роль в тепловом балансе Земли.

Внешние слои атмосферы Земли перехватывают приблизительно одну миллионную часть энергии, излучаемой Солнцем, или приблизительно  $1,5 \cdot 10^{18}$  кВт·ч ежегодно. Однако из-за отражения, рассеивания и поглощения ее атмосферными газами и аэрозолями только 47% всей энергии достигает поверхности Земли.

При прохождении через атмосферу солнечное излучение ослабляется за счет процессов поглощения и рассеяния. Это ослабление зависит от длины пути солнечных лучей в атмосфере, которая называется массой атмосферы. Масса атмосферы  $m = 1$ , когда длина пути отсчитана от уровня моря по вертикали (положение Солнца в зените). При зенитном угле  $\theta_z$  (угол между вертикалью и направлением на Солнце) масса атмосферы  $m = \frac{1}{\cos \theta_z} = \sec \theta_z$ , (см. рис. 3).

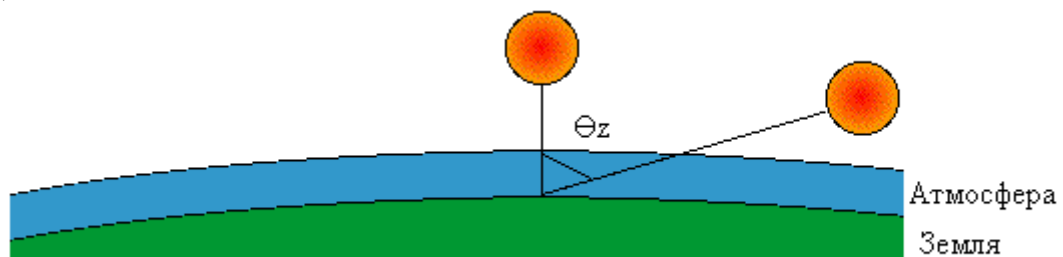


Рисунок 3 – Длина пути солнечных лучей в атмосфере

Поглощение солнечной радиации атмосферой обусловлено в основном присутствием в ней озона, водяных паров и  $\text{CO}_2$ . Озон почти полностью поглощает излучение в ультрафиолетовой части спектра до 0,29 мкм, – поглощает до 0,35 мкм и не поглощает в остальной части спектра за исключением узкой зоны длин волн вблизи 0,6 мкм. Водяные пары и  $\text{CO}_2$  вызывают появление достаточно широких зон поглощения в ближней ИК-области.

Полученные при прямых измерениях данные по солнечной радиации обрабатываются и представляются в табличной или графической форме.

Угол падения солнечных лучей  $\theta$  на рассматриваемую плоскость в заданный момент времени может быть вычислен с помощью следующего соотношения:

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – широта местности;

$\delta$  – склонение (угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора);

$\beta$  – угол между рассматриваемой плоскостью и горизонтальной плоскостью;

$\gamma$  – азимутальный угол (угол между проекцией нормали к рассматриваемой плоскости и местным меридианом);

$\omega$  – часовой угол (отсчитанный от солнечного полдня, угловое смещение Солнца относительно местного меридиана, обусловленное вращением Земли и соответствующее  $15^\circ$  в час).

При отсчете углов соблюдаются следующие правила:

значения  $\varphi$  и  $\delta$  положительны для северного полушария и отрицательны для южного;  $\gamma$  отсчитывается от южного направления и имеет положительный знак при отклонении к востоку и отрицательный - при отклонении к западу;  $\omega$  равняется нулю в солнечный полдень, до полудня имеет отрицательные значения, после полудня – положительные. Склонение  $\delta$  определяется по формуле:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right), \quad (3)$$

где  $n$  - порядковый номер дня года.

Часто из литературных источников известны данные по солнечной радиации, приходящейся на горизонтальную поверхность, а при расчете гелиотехнического оборудования обычно нужны данные по солнечной радиации, приходящейся на наклонную поверхность.

Если известной величиной является среднемесячный дневной приход суммарной радиации на горизонтальную поверхность  $H$ , то среднемесячный дневной приход суммарной радиации на наклонную поверхность  $H_T$  может быть рассчитан по формуле:

$$H_T = R \cdot H, \quad (4)$$

где  $R$  – коэффициент, зависящий от широты местности  $\varphi$ , угла наклона к горизонту  $\beta$  и показателя облачности  $K_T$ . Показатель облачности  $K_T$  определяется через среднемесячный дневной приход солнечной радиации на горизонтальную поверхность за пределами земной атмосферы  $H_0$ :

$$K_T = \frac{H}{H_0}, \quad (5)$$

## **1.2 Потенциал и перспективы использования солнечной энергии в Республике Казахстан**

Солнечная энергия может использоваться как для производства электроэнергии (точнее говоря, путем преобразования солнечной радиации в электрическую энергию), так и для отопления и горячего водоснабжения.

Территория Казахстана расположена между  $40$  и  $50^\circ$  северной широты;  $70$  и  $80^\circ$  восточной долготы. Период с положительными температурами воздуха составляет на Западе 9-10 месяцев, на Востоке 8-9 месяцев, но жарких

дней на Востоке значительно больше чем на Западе. Сухой жаркий климат характеризуется совокупностью характерных для местности метеорологических условий: продолжительным (более 100 дней в году) знойным летом, высокими температурами воздуха (абсолютной более 40°C, среднесуточной температурой самого жаркого месяца более 20 °C) и средней относительной влажностью воздуха менее 50 %, случайными осадками [6]. Климат характеризуется большим числом ясных дней (особенно в летний период), высокой температурой воздуха и незначительным количеством атмосферных осадков в течение года. Однако для решения практических задач только таких характеристик недостаточно, работа установок по использованию солнечной энергии, которая определяется величиной прямой и диффузной радиации, продолжительности солнечного сияния в течение дня, прозрачности атмосферы, температурой окружающего воздуха и т.д.

Характер рельефа и особенности атмосферных условий определяют фактический радиационный режим, что необходимо учитывать при выборе и проектировании гелиотехнических установок. Радиационный режим территории Казахстана, особенно ее южных районов, в целом является благоприятным для практического использования солнечной энергии.

Для получения количества солнечной радиации в Казахстане было проведен анализ среднегодового значения солнечной радиации северного и южного регионов Казахстана (см. табл. 1 и 2) [3].

Таблица 1 – Среднегодовое значение солнечной радиации северного региона

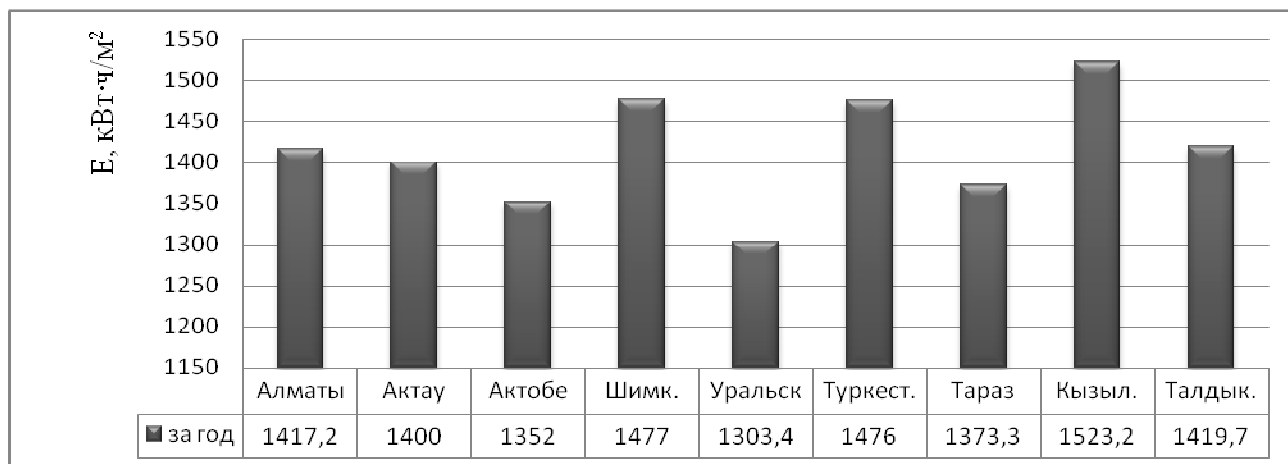
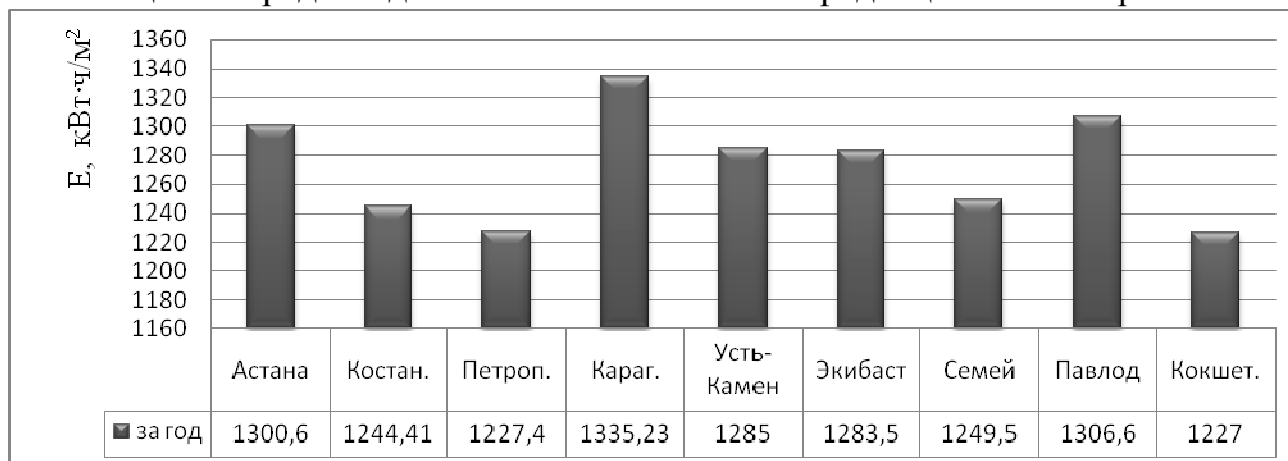


Таблица 2 – Среднегодовое значение солнечной радиации южного региона



Значительная часть территории Казахстана характеризуется средней интенсивностью солнечной радиации. В реальных условиях облачности годовой приход суммарной солнечной радиации находится на уровне 1227 – 1523,2 кВт·ч/м<sup>2</sup> (см. табл. 1 и 2) при общем увеличении с Севера на Юг. При этом вклад рассеянной радиации составит 40 – 50%. Доля прямой солнечной радиации изменяется на протяжении года. В период с ноября по февраль она составляет 20 – 40%, с марта по октябрь – 40 – 75%.

На суточный ход солнечной радиации влияет прозрачность атмосферы. Как правило, в летнее время в первую половину дня атмосфера более прозрачна. Интенсивность и часовые суммы прямой и рассеянной солнечной радиации в летние месяцы утром больше на 3 – 4%, чем в соответствующие по высоте Солнца вечерние часы.

Годовое число часов солнечного сияния для г. Павлодар 4395,67 ч. (см. табл. 3). Это число было подсчитано с помощью программы «Солнечный калькулятор» (см. рис. 4). В остальной части Казахстана число часов солнечного сияния составляет  $\pm 10\%$ . Наиболее солнечные месяцы: май – август, меньше всего солнца в ноябре: январе – феврале.

Солнечные установки (даже с учетом высоких начальных капиталовложений) достаточно эффективны в благоприятных климатических условиях, к которым относится практически вся территория Казахстана.

**Солнечный калькулятор**

Настройки    Помощь

Дата: 21 / 4 / 2010    День: 111    Местное время: 13 h 31 m 31 s    Звездное время: 2 h 36 m 19 s    M.J.D.: 55307,31355

Место: Павлодар    Долгота: 76° 56' Вост.    Широта: 52° 18' Сев.    Часовой пояс: 6 h

**Координаты Солнца**

| Долгота   | Пр. восх.     | Склонение   | Высота            | Зенитный угол | Азимут    |
|-----------|---------------|-------------|-------------------|---------------|-----------|
| 31,0958 ° | 1 h 55 m 50 s | 11° 51' 17" | Ист. 48,739 °     | 41,261 °      | 195,116 ° |
|           |               |             | Вид. 48,753 °     | 41,247 °      |           |
|           |               |             | Макс.ист. 49,55 ° |               |           |

Воздушная масса: 1,33

Расстояние от Земли: 1,0050491432 а. е. / 150353211 km

Угловой диаметр: 31' 50"

Верхняя кульминация: 12 h 51 m

Уравнение времени в полдень: 1,2 m

Восход: 5 h 43 m    Заход: 20 h 0 m

Выбор режима: ☒ Автомат    ☐ Ручной

Вычислить    Конец

Рисунок 4 – Горизонтальные координаты Солнца в г. Павлодар, время восхода и захода

Таблица 3 – Продолжительность фактического солнечного сияния в месяц (часов) для г. Павлодар

| Янв.   | Февр.  | Март   | Апр.   | Май    | Июнь   | Июль   | Авг.       | Сент.  | Окт.   | Нояб.  | Дек.   | Год     |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 250,28 | 272,39 | 361,59 | 411,27 | 481,41 | 492,01 | 495,61 | 446,3<br>8 | 372,94 | 322,70 | 257,65 | 231,44 | 4395,67 |

Больше всего количества солнечной энергии на территории Казахстана в г. Кызылорда – 1523,2 кВт.ч/м<sup>2</sup>, само мало в г. Кокшетау – 1227 кВт.ч/м<sup>2</sup>, в г. Павлодаре – 1306,6 кВт.ч/м<sup>2</sup>. Среднегодовое значение солнечной радиации южного региона Казахстана значительно больше, чем в северной части, это объясняется их географическим положением.

Освоение солнечной энергии с целью получения электрической энергии проводится по двум основным направлениям: фотоэлектрическому и термодинамическому. Фотоэлектрическое – непосредственное преобразование электромагнитного излучения Солнца оптического диапазона в электрическую энергию постоянного тока с помощью специальных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе кремния, арсенида галлия и других широко известных проводников. Термодинамическая – солнечная энергия концентрируется на котле, пар из которого поступает в турбину с генератором (создание солнечных тепловых электрических станций).

Использование солнечной энергии для теплоснабжения, кроме экономии топлива, способствует охране окружающей среды, причем для отдельных регионов результат может быть значительным.

Перспективным является использование так называемых систем пассивного солнечного отопления, то есть систем, в которых не используется специальное оборудование, а сами конструкционные элементы зданий и сооружений являются приемниками и аккумуляторами солнечной энергии. Такие системы позволяют в различных климатических зонах экономить от 20 до 60% топлива расходуемого на отопление.

Это практическое направление солнечной энергетики является наиболее освоенным. В основе лежит использование устройств, преобразующих солнечную радиацию в теплоту. Установки солнечного теплоснабжения используются для горячего водоснабжения, отопления и кондиционирования воздуха в жилых, общественных, санаторно-курортных зданиях, подогрева воды в плавательных бассейнах, а также в различных процессах сельскохозяйственного производства.

Оценивая в целом состояние солнечной энергетики в Казахстане, его можно характеризовать как начальную стадию развития этого направления. По мере совершенствования технологических решений и повышения экономичности солнечных энергоустановок масштабы использования солнечной энергии будут увеличиваться.

### 1.3 Классификация солнечных энергетических установок и их особенности

Солнечная энергия весьма универсальная с точки зрения возможностей ее использования человеком для своих нужд. Солнечное излучение СИ может быть относительно легко преобразовано в тепловую, механическую и электрическую энергию, а также может быть использовано в химических и биологических процессах.

В зависимости от технологических схем солнечные энергетические установки СЭУ могут существенно отличаться друг от друга – от простейших нагревательных плоских поверхностей до сложнейших систем управления для слежения за Солнцем с целью получения максимального прихода СИ на принимающую поверхность ПП.

Мировой опыт использования солнечного излучения СИ в энергетических целях позволяет выделить три основных условия или варианта функционирования солнечных энергетических установок СЭУ:

работа СЭУ в составе большой объединенной энергетической системы (ОЭС);

работа СЭУ на локальную энергосистему относительно небольшой мощности;

работа СЭУ на малого автономного потребителя.

Рассмотрим особенности требований к исходной информации по СИ и для трех условий:

1. Работа СЭУ в составе большой ОЭС совместно с традиционными ТЭС, ГЭС и АЭС. В этом случае:

$$\sum_{i=1}^n N_{уст\ i}^{СЭУ} \ll P_c^{\max}, \quad (6)$$

где  $N_{уст\ i}^{СЭУ}$  – установленная мощность  $i$ -ой СЭУ;

$P_c^{\max}$  – максимум нагрузки ОЭС.

Все СЭУ в этом случае - дублированная мощность ОЭС с нулевой гарантированной мощностью без использования на СЭУ аккумуляторов энергии, поскольку в данном случае это нецелесообразно. СЭУ здесь должны работать по критерию максимальной выработки электроэнергии или тепловой энергии с целью получения максимальной экономии невозобновляемого ископаемого органического топлива. Это означает, что в этом случае, возможно, использовать в качестве расчетных интервалов – месячные или среднемесячные суточные для расчета месячного прихода солнечной энергии и расчета возможной выработки на СЭУ рассматриваемого типа. СЭУ в этом случае никак не влияют на надежность работы всей ОЭС в целом.

2. Работа СЭУ в составе локальной энергосистемы (ЛЭС) совместно с традиционными типами энергоустановок, как правило, мощных (сотни кВт)

дизельных энергетических установок ДЭУ. В этом случае мощность СЭУ сопоставима с мощностью всех ДЭУ в ЛЭС, т.е.:

$$\sum_{i=1}^n N_{уст i}^{СЭУ} = \left( \sum_{j=1}^m N_{уст j}^{ДЭУ} \right) \cdot K_{СЭУ}, \quad (7)$$

где  $0 \leq K_{СЭУ} \leq 1$

Надежную и бесперебойную работу всей системы энергоснабжения ЛЭС здесь обеспечивают ДЭУ, чья общая установленная мощность должна гарантированно обеспечивать покрытие графика нагрузки ЛЭС в целом, т.е.

$$\sum_{j=1}^m N_{уст j}^{ДЭУ} > P_{ЛЭС}^{\max}, \quad (8)$$

СЭУ здесь также как и в первом условии работают по критерию максимального вытеснения невозобновляемого ископаемого органического топлива при нулевой гарантированной мощности без использования специальных аккумуляторов избыточной в некоторые периоды времени выработки СЭУ. Однако, учитывая четкий закономерный цикл прихода СИ в течение суток здесь уже возможно и даже иногда целесообразно использование аккумуляторов избыточной энергии СЭУ. Это означает, что в данном случае в качестве расчетных интервалов времени следует использовать суточные интервалы без учета аккумуляции энергии и даже часовые - с учетом аккумуляторов энергии. При значительной доле СЭУ в ЛЭС и наличии аккумуляторов (т.е. когда  $K_{СЭУ} = 1$ ) СИ начинает влиять и на условия обеспечения надежного функционирования всей ЛЭС в целом.

3. Работа СЭУ на локального потребителя малой мощности (кВт или десятки кВт) совместно с традиционными типами энергоустановок (ДЭУ) или без них с аккумуляторами энергии различного цикла аккумуляции. В данном случае особое значение приобретает учет категорий типов потребителей по показателям надежности энергоснабжения. Мощность СЭУ уже сопоставима с  $P_{потр}^{\max}$

$$\sum_{j=1}^m N_{уст j}^{ДЭУ} \approx P_{потр}^{\max}, \quad (9)$$

Здесь СЭУ, имеющие нулевую гарантированную мощность, обязательно должны сочетаться с аккумуляторами энергии разного цикла аккумуляции в зависимости от конкретного типа потребителя СЭУ здесь обеспечивают как надежную работу всей системы энергоснабжения автономного потребителя, так и экономию невозобновляемого ископаемого органического топлива.

В этом случае в качестве расчетных интервалов времени следует использовать часовые интервалы, а для очень ответственных потребителей и, текущие значения прихода СИ во времени, т.е.  $R_{\Sigma}(t)$ .

Учитывая все сказанное выше можно сделать заключение о том, что для гелиоэнергетических расчетов при обосновании параметров и режимов разных типов СЭУ, работающих в разных вариантах или условиях их функционирования, требуется достаточно специфическая во всех отношениях исходная информация по СИ в рассматриваемой точке или на территории  $S$  (м или км). На величину прихода СИ будут влиять как основные и вспомогательные углы ориентации приемной площадки на Солнце, так и энергетические показатели технологических схем реализации СЭУ, а также социально-экологические факторы в рассматриваемом регионе.

## 2 ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, КОНСТРУКЦИЯ И НАПРАВЛЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

### 2.1 Переходы в полупроводниках фотоэлектрических элементов, работа солнечного элемента

Фотоэлектрический преобразователь (солнечный элемент) представляет собой полупроводниковый диод с большой площадью поверхности. Фактически ФЭП представляет собой полупроводниковую пластину с p-n переходом и нанесенными металлическими контактами (см. рис. 5).

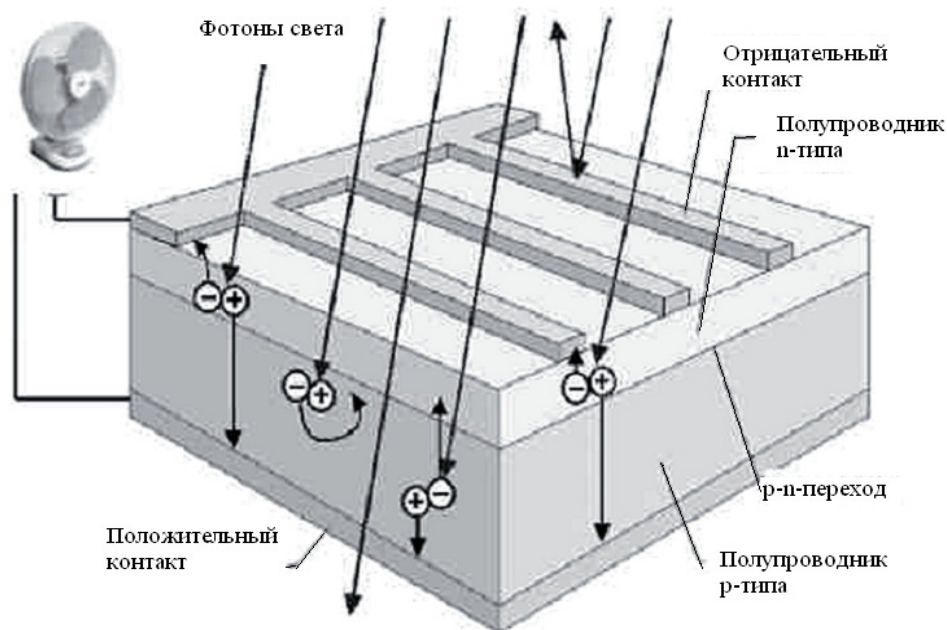


Рисунок 5 – Внутреннее устройство фотоэлектрического преобразователя

Из фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) собирают фотоэлектрические модули (солнечные модули), а из модулей солнечные батареи (см. рис. 6).

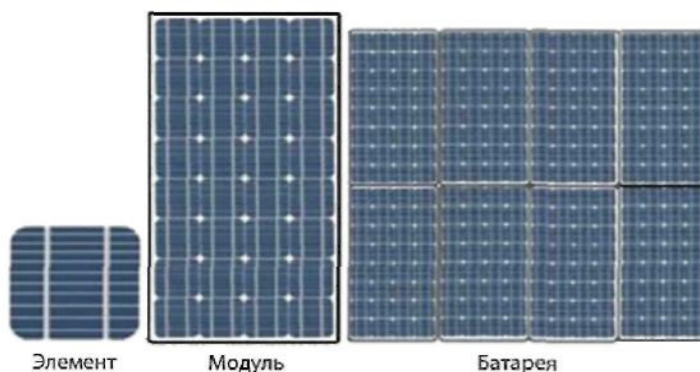


Рисунок 6 – Фотоэлектрический преобразователь, фотоэлектрический модуль и батарея фотоэлектрических модулей

Солнечное излучение поглощается в полупроводнике, образуя электронно-дырочные пары, которые разделяются р-n переходом и снимаются металлическими контактами на передней и тыльной поверхностях элемента. (см. рис. 7).

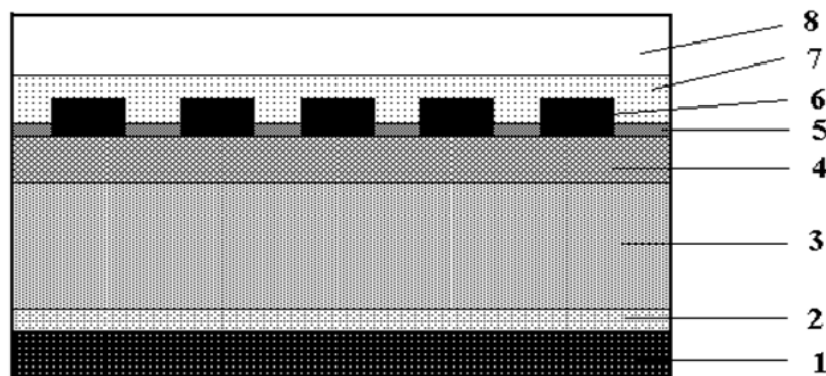


Рисунок 7 – Схематическое изображение вертикального сечения монокристаллического кремниевого ФЭП

1 – тыльный сплошной токосъемный электрод; 2 – слой кремния р -типа проводимости; 3 – кремний р-типа проводимости; 4 – слой кремния n -типа проводимости; 5 – просветляющее покрытие; 6 – фронтальный гребенчатый токосъемный электрод; 7 – клеящий слой прозрачного кремнийорганического каучука; 8 – защитное боросиликатное стекло.

Полупроводниковые приборы изготавливаются из исходных базовых пластин р- или n-типа, на которые наносятся легирующие слои, содержащие одну или несколько примесей для образования р-n-переходов. Р-n-переходом называют поверхность раздела между слоями, имеющими проводимость противоположного знака. Для получения представления о конструкции современного солнечного элемента со слоем n-типа, созданным в поверхностном слое базовой пластины р-типа, рассмотрим полупроводниковый кристалл, содержащий р-n-переход, схематически показанный на рис. 8.

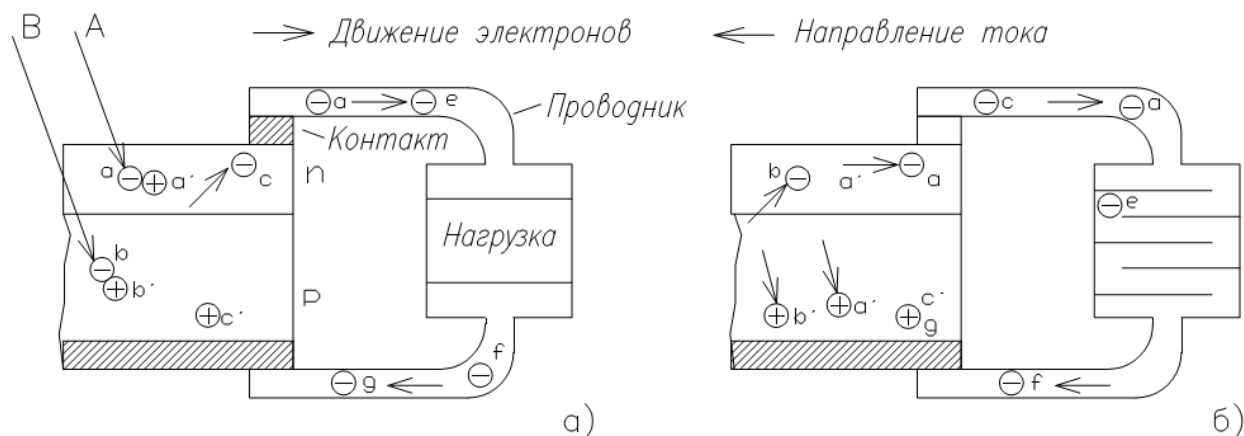


Рисунок 8 – Генерирование электрического тока солнечным элементом (элемент дан в разрезе):

а) – фотоны А и В образовали электронно-дырочные пары  $aa'$  и  $bb''$ . Электрон с и дырка  $c'$ , образованные предыдущим фотоном, движутся к контактам солнечного элемента. Электроны d, e, f и g перемещаются по внешней цепи, образуя электрический ток;

б) – дырка, образованная фотоном А, прошла через переход и направляется к положительному контакту. Электрон, образованный фотоном В, также прошел через переход и движется к отрицательному контакту. Электрон g перешел из полупроводника в проводник. Электрон g перешел в полупроводник и рекомбинировал с дыркой  $c'$

Области p и n кремниевого солнечного элемента состоят из кремния с собственной проводимостью. Проводимость p-типа создается в процессе выращивания кристалла кремния добавлением относительно небольшого количества элемента III группы в расплав. n-Область образуется в процессе формирования перехода диффузионным способом. При диффузии пластинки материала p-типа (для изготовления солнечных элементов) помещают при повышенной температуре в среду, содержащую элемент V группы. Примеси n-типа, диффундирующие с поверхности в глубь материала базовой пластины, замещают кремний в кристаллической решетке и за счет большей, чем у примеси p-типа, концентрации изменяют тип проводимости. Изменение проводимости материала с p-типа на n-тип происходит в области перехода толщиной менее 1 мкм. p-n-Переход является идеализированным электрическим понятием, не отражающим все особенности реального физического перехода от материала p-типа к материалу n-типа. Лишь какая-то часть реального перехода подчиняется теоретическим закономерностям, выведенным для идеального p-n-перехода.

Изготовление солнечного элемента завершается созданием металлических контактов на полупроводниковых слоях. Неосвещенный солнечный элемент проводит электрический ток, поступающий от внешнего источника, только в одном направлении. Следовательно, любым полупроводниковым p-n-переходом можно определять полярность источника питания. Это свойство p-n-переходов используется, например, в выпрямительных диодах.

Пусть солнечный элемент, описанный выше, освещается солнечным светом. Фотоны с различной энергией будут поглощаться в полупроводниковом материале на различной глубине (см. рис. 10). На рисунке показана также внешняя нагрузка (например, сопротивление), присоединенная к контактам элемента. На данном рисунке реальные пропорции сильно изменены для большей наглядности. В верхней части рисунка фотоны А и В выбили электроны из соответствующих атомов полупроводника. Фотон А имеет большую энергию (меньшую длину волны), чем фотон В. На месте выбитых электронов образовались две электрические вакансии — дырки. В этом случае говорят, что фотоны образовали электронно-дырочные пары. Теперь электроны и дырки могут двигаться по материалу полупроводника под

действием электрических полей, образовавшихся в материале под влиянием р-п-перехода.

Электроны притягиваются п-областью, а дырки - р-областью. Следовательно, структура солнечного элемента играет роль помпы, как бы перекачивающей электроны в п-область через внешнюю нагрузку и обратно к контакту с р-областью. На поверхности раздела контакт - р-область полупроводника электроны занимают место дырок, т. е. рекомбинируют, при этом они становятся электрически нейтральными до тех пор, пока новый фотон снова не разделит их на электронно-дырочную пару.

Установившаяся контактная разность потенциалов определяется как

$$v_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{p_n} = \frac{\Delta \epsilon_0}{e} - \frac{kT}{e} \ln \frac{v_n v_p}{N_n N_d}, \quad (10)$$

где  $n_p$ ,  $n_n$  - концентрация электронов;

$p_p$ ,  $p_n$  - концентрация дырок в материалах п и р-типа;

$\Delta \epsilon_0$  - ширина запрещенной зоны вещества;

$v_n = 2(2\pi m_n \cdot KT)^{\frac{3}{2}} h^3$ ,  $v_p = 2(2\pi m_p \cdot KT)^{\frac{3}{2}} h^3$  - эффективная плотность состояний электронов и дырок в зоне проводимости (валентной зоне);

$N_a$ ,  $N_d$  - концентрация акцепторов и доноров;

$T$  - температура полупроводника.

Поток основных носителей заряда через р-п переход представляет собой диффузионный ток  $I_d$ , поток неосновных носителей - дрейфовый ток  $I_s$ . При равновесии токи  $I_d$  и  $I_s$  по абсолютной величине равны и результирующий ток через р-п переход равен нулю.

Приложение к р-п переходу положительного потенциала ( $U > 0$ , прямое смещение) приводит к изменению взаимного расположения уровней Ферми уменьшению потенциального барьера, росту диффузионного тока (дрейфовый ток остается неизменным). Результирующий ток через р-п переход носит название прямого тока. Если  $U < 0$  (обратное смещение), то барьер увеличивается диффузионный ток уменьшается, дрейфовый ток остается неизменным. Результирующий ток называется обратным током. Уравнение вольт-амперной характеристики (ВАХ) р-п перехода в этом случае имеет вид:

$$I = I_s (2e^{\frac{eU}{kT}} - 1), \quad (11)$$

где  $U$  - внешнее напряжение, приложенное к р-п переходу, с учетом знака;  $I_s$  - значение, к которому стремится обратный ток при увеличении обратного напряжения.

Когда монохроматическое излучение с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны, падает на полупроводник вблизи р-п перехода, в нем образуются новые пары электрон-дырка.

Если внешняя цепь разомкнута, то устанавливается динамическое равновесие первичного светового тока избыточных неосновных носителей  $I_{св}$ , созданных квантами света, и тока, обратного ему по направлению, обусловленного накоплением пространственных зарядов. Результирующая разность потенциалов представляет собой фото-ЭДС. При подключении внешней нагрузки происходит ответвление тока во внешнюю цепь. Суммарный ток по-прежнему будет равен световому. Поскольку направление фото-ЭДС и контактной разности потенциалов противоположно, ток  $I_n$  во внешней цепи будет равен:

$$I_n = I_{св} - I_{nac} \left( e^{\frac{eU_\phi}{kT}} - 1 \right), \quad (12)$$

где  $I_{nac} = I_c$  - ток неосновных носителей, проходящих через неосвещенный р-п переход, равный току насыщения;  $U_\phi$  - напряжение на зажимах фотоэлемента при включении нагрузки во внешнюю цепь.

Это уравнение представляет собой ВАХ ФЭП.  $U_\phi$  Значение равно:

$$U_\phi = \frac{KT}{e} \ln \left( \frac{I_{с.с} - I_n}{I_{n.ac}} + 1 \right), \quad (13)$$

Для разомкнутой цепи  $I_n = 0$ , откуда ЭДС фотоэлемента

$$E_\phi = \frac{KT}{e} \ln \left( \frac{I_{с.с} - I_n}{I_{n.ac}} + 1 \right), \quad (5)$$

Максимальное значение  $eE_\phi$  не может быть больше  $\Delta\epsilon_0$ . Значение генерируемого светом тока короткого замыкания  $I_{к.з.} = I_{св}$  определяется формулой:

$$I_{св} = I_{к.з.} = e \cdot \int_{\Delta\epsilon_0 = h\nu}^{\infty} Q_T(h\nu) \cdot N_\phi(h\nu) d(h\nu), \quad (14)$$

где  $Q_T(h\nu)$  - коэффициент собирания неосновных носителей (или абсолютная спектральная чувствительность элемента), который согласно определению показывает, какая часть носителей, генерированных при поглощении фотонов с энергией  $h\nu$ , дает вклад в  $I_{к.з.}$ ,  $N_\phi(h\nu)$  - плотность потока фотонов с энергией  $h\nu$ , падающих на ФЭП.

Технология производства ФЭП должна обеспечивать коэффициент собирания, близкий к единице, для всех фотонов солнечного спектра, энергия которых больше ширины запрещенной зоны.

На форму ВАХ существенное влияние оказывает сопротивление элемента: при его увеличении форма ВАХ становится более плоской, коэффициент заполнения и мощность уменьшаются. По ВАХ можно определить значения напряжения  $U_m$  и тока  $I_m$ , соответствующие режиму максимальной мощности:

$$(1 + \frac{U_m}{KT}) e^{\frac{eU}{KT}} = e^{\frac{eE_\phi}{KT}}, \quad (15)$$

$$I_m = I_{cв} - I_{нас} (E^{\frac{eU_m}{KT}} - 1) = I_{cв} (1 + \frac{I_{нас}}{I_{cв}}) \cdot \frac{eU_m}{kT + eU_m}, \quad (17)$$

Для максимальной мощности имеет вид:

$$N_m = I_m U_m = I_{cв} U_m (1 + \frac{I_{нас}}{I_{cв}}) \cdot \frac{eU_m}{kT + eU_m} = \frac{eI_{cв} U_m^2}{kT + eU_m}, \quad (18)$$

У серийных кремниевых элементов при солнечном освещении

$$I_{cв} = 35 \frac{mA}{cm^2} \text{ и } I_{нас} = 10^{-8} \frac{A}{cm^2}, \text{ т.е. } \frac{I_{нас}}{I_{cв}} < 10^{-4}.$$

Максимальный КПД, т.е. КПД при согласованной нагрузке, представляется выражением:

$$\eta_{\max} = \frac{I_m U_m}{N_{подв}} = \frac{eI_{cв} U_m^2}{(kT + eU_m) N_{подв}} = k \frac{I_{cв} E}{N_{подв}}, \quad (19)$$

где  $k$  - коэффициент заполнения, который определяет степень приближения ВАХ к прямоугольной форме. При  $\frac{I_{cв}}{I_{нас}} < 10^4$ ,  $K \leq 0,72$ , т.е.

$$\eta_{\max} = 0,72 \frac{I_{cв} E}{N_{подв}}.$$

При поступлении на ФЭП, имеющий температуру  $T_2$ , энергии в узком спектральном интервале от пороговой частоты  $\nu_{\min}$  до  $\nu_{\min} + \frac{kT_2}{h}$  из общего излучения абсолютно черного тела, нагретого до температуры  $T_1$ , его предельный КПД будет равен КПД цикла Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (20)$$

С учетом джоулевых потерь в самом ФЭП максимальный КПД имеет следующий вид:

$$\eta_0 = (1 - \frac{T_2}{T_1}) \cdot (1 - \frac{\ln(\frac{\Delta \epsilon_0}{kT_2} (1 - \frac{T_2}{T_1}) + 1)}{\frac{\Delta \epsilon_0}{kT_2} (1 - \frac{T_2}{T_1})}) = \eta_k \eta_s, \quad (21)$$

Предельный КПД фотоэлемента, преобразующего солнечное излучение, имеет вид:

$$\eta = \eta_0 \eta_c, \quad (22)$$

где  $\eta_c$  - КПД преобразования солнечного света, равен отношению мощности использованного излучения эквивалентного черного тела к мощности солнечного излучения и может быть определен из зависимости  $\eta_c$  от  $x_0$  (рис. 9)

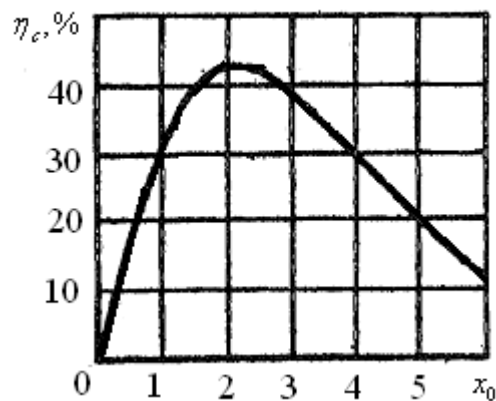


Рисунок 9 – КПД преобразования солнечного света

$$\eta_c = f(x_0), \quad (23)$$

где  $x_0 = \frac{\Delta \epsilon_0}{kT_c}$

$T_c$  - температура поверхности Солнца.

Значение  $\eta_0$  вычисляется по формуле (17) при подстановке эквивалентной температуры абсолютно черного тела  $T_l$ .

## 2.2 Основные характеристики фотоэлектрохимического элемента

Коэффициент полезного действия КПД устройства для преобразования солнечной энергии в электрическую или химическую, по определению, равен:

$$\eta = \frac{\text{Потери энергии на выходе}}{\text{Потери энергии на входе}} \cdot 100\%, \quad (24)$$

Его можно условно представить, как произведение нескольких сомножителей, каждый из которых количественно учитывает определенный тип потерь энергии в полном преобразовании:

$$\eta = K_{thr} \cdot K_{st} \cdot Y \cdot f \cdot 100\%, \quad (25)$$

Рассмотрим физический смысл этих сомножителей.

1. Величина  $K_{thr}$  учитывает потери, обусловленные пороговым (квантовым) характером поглощения света в полупроводнике. Собственное поглощение света, приводящее к образованию пар электрон - дырка, возможно лишь при такой энергии кванта, которая, в зависимости от типа межзонного перехода, равна ширине запрещенной зоны или несколько превышает ее:  $h\nu = E_g$ . При таком характере поглощения преобразование энергии немонохроматического света, каким является солнечный свет, сопряжено с неизбежными потерями. Действительно, кванты меньшей энергии, чем  $E_g$ , попросту не способны к генерации электронно-дырочных пар. Но и кванты с энергией, превышающей  $E_g$ , не используются полностью: излишек энергии рассеивается, нагревая полупроводник, но не увеличивая сколько-нибудь заметно число носителей тока. Для кремния из-за недостаточной энергии фотонов теряется около 24% энергии солнечного света, в то же время более 32% «избыточной» энергии квантов превращается в теплоту. Значение  $K_{thr}$  определяется конкретным спектром источника излучения и выбранным значением  $E_g$ :

$$K_{thr} = E_g \int_{E_g}^{\infty} N(E) \cdot (1 - R) \frac{dE}{EN(E)dE}, \quad (26)$$

где  $N(E)$  - число квантов света с энергией  $E = h\nu$ , падающих в единицу времени на поверхность полупроводника;  $R(E)$  - коэффициент отражения света от поверхности полупроводника.

Для солнечного спектра рассчитанная зависимость  $K_{thr}$  от  $E_g$  представлена на рис. 26. Она представляет собой кривую с максимумом вблизи некоторого оптимального значения ширины запрещенной зоны  $E_g^{opt} = 1,1 - 1,5$  эВ (точное значение  $E_g^{opt}$  несколько меняется с изменением спектрального распределения, которое в свою очередь зависит от «атмосферной массы» - толщины слоя атмосферы, сквозь который прошли солнечные лучи).

Приведенный интервал  $E_g^{opt}$  ограничивает круг полупроводниковых материалов, которые могут быть использованы для создания эффективных преобразователей энергии солнечного излучения. Ближе всего к «идеальному» полупроводнику оказываются Si ( $E_g = 1,11$  эВ), InP (1,28 эВ), GaAs (1,43 эВ), CdTe (1,50 эВ).

2. Величина  $K_{st}$  характеризует эффективность запасаения энергии, т.е. эффективность использования энергии ( $\approx E_g$ ) электронно-дырочной пары, образовавшейся в элементарном акте фотовозбуждения, для последующего получения полезной работы. При преобразовании световой энергии в химическую в продуктах фотоэлектрохимической реакции на выходе элемента запасается энергия, равная изменению энергии Гиббса  $\Delta G$ , поэтому

$$K_{st}^{ch} = \frac{\Delta G}{E_g}, \quad (27)$$

В солнечных батареях для преобразования энергии света в электрическую энергию (как в твердофазных, так и в фотоэлектрохимических) мерой полезной работы, которую можно произвести за счет энергии возбужденных носителей тока, служит фотопотенциал при разомкнутой цепи  $\varphi_{ph}^{o.c}$ . Тогда

$$K_{st}^{el} = \frac{\varphi_{ph}^{o.c}}{E_g}, \quad (28)$$

3. Квантовый выход  $Y$ , по определению, равен отношению числа электронов, перенесенных во внешней цепи элемента (или в химической реакции образования новых веществ), к числу падающих на поверхность фотоприемника квантов света:

$$Y = \frac{i_{ph}}{eJ_0}, \quad (29)$$

В элементах регенеративного типа  $i_{ph}$  равен фототоку короткого замыкания солнечной батареи  $i_{sh.c}$ , в случае микрогетерогенных систем для преобразования солнечной энергии в химическую вместо фототока следует подставить скорость образования нового вещества (в электрических единицах) в первичном акте реакции.

4. Наконец, четвертый множитель  $f$  - так называемый фактор заполнения вольт-амперной характеристики - учитывает потери энергии, вызываемые омическим падением напряжения, а также перенапряжением в фотоэлектрохимическом элементе при протекании тока. Для элементов регенеративного типа он равен:

$$f = \frac{(i_{ph} \varphi_{ph})_{MPP}}{i_{sh.c} \varphi_{ph}^{o.c}}, \quad (30)$$

В числителе стоит максимальная отдаваемая элементом электрическая мощность (т. е. максимальное значение произведения фототока и напряжения, которое можно получить из его вольт-амперной характеристики), в знаменателе - произведение тока короткого замыкания и фотопотенциала при разомкнутой цепи элемента. Значение фактора заполнения  $f$  зависит от формы вольт-амперной характеристики: чем меньше омические и иные потери напряжения, тем она более «прямоугольная», и тем выше  $f$ . В хороших солнечных батареях  $f$  достигает значений 0,70 – 0,75. Напротив, при большом сопротивлении в системе форма вольт-амперной характеристики близка к линейной, и  $f$  невелик (0,30 – 0,25).

Рассмотрим кратко влияние свойств полупроводника и электромагнитного излучения на перечисленные характеристики фотоэлектрохимического преобразователя энергии. Связь между  $K_{thr}$  и шириной запрещенной зоны обсуждалась выше. Величина квантового выхода фототока, как следует из уравнения (29), определяется соотношением между коэффициентом оптического поглощения света  $\alpha$ , толщиной обедненного слоя  $L_{sc}$  и диффузионной длиной неосновных носителей  $L_p$ . Первая из перечисленных величин зависит от типа оптических переходов в полупроводнике, вторая - от концентрации основных носителей, которая регулируется введенными в полупроводник донорными или акцепторными примесями, третья - от совершенства кристаллической структуры материала и концентрации в нем случайных примесей и дефектов, служащих центрами рекомбинации.

Оптимальное значение толщины обедненного слоя лежит в интервале  $10^{-6} - 10^{-5}$  см (соответствует концентрации основных носителей  $10^{15} - 10^{18}$  см $^{-3}$ ). При больших  $L_{sc}$  напряженность электрического поля в обедненном слое снижается, так что время пролета носителей может стать больше их времени жизни, и тогда часть генерированных светом носителей рекомбинирует внутри обедненного слоя. Кроме того, становится весьма вероятным упоминавшийся выше нежелательный процесс диффузии основных носителей против электрического поля и их переход в раствор. При меньших  $L_{sc}$  основные носители вместо того, чтобы дрейфовать в поле обедненного слоя в глубь полупроводника, могут туннелировать сквозь обедненный слой в раствор. Всё это уменьшает степень разделения зарядов и снижает квантовый выход

При выполнении условия  $\alpha^{-1} \ll L_{sc}$  весь свет поглощается в области пространственного заряда, и фототок достигает своего максимально возможного значения  $eJ_0$ . Но этому условию удовлетворяют лишь полупроводники с прямыми переходами, у которых  $\alpha$  составляет  $10^5$  см $^{-1}$  и более.

В более распространенных полупроводниках с непрямыми переходами  $\alpha$  обычно не превышает  $10^4$  см $^{-1}$  (и медленно растет с ростом  $h\nu$ ), так что  $\alpha^{-1} \gg L_{sc}$ . Этот недостаток следует компенсировать увеличением диффузионной длины; действительно, как следует из уравнения (29), в рассматриваемом случае фототок пропорционален  $\alpha(L_{sc} + L_p)$ . Однако увеличение  $L_p$  требует применения особо чистого материала с совершенной кристаллической структурой. Это ограничивает возможность использования поликристаллических полупроводников, не подвергнутых специальной очистке, и потому недорогих.

Ограничения, накладываемые на удельное сопротивление материала электрода (определяемое концентрацией легирующей примеси), а также на его геометрические размеры и форму, вытекают, во-первых, из условия  $\alpha^{-1} \ll L_{sc}$ , а также из требования малого омического падения потенциала в элементе. Для ориентировки приведем типичные значения фототока короткого замыкания  $i_{sh.c}$  в элементах (10-30 мА/см $^2$ ) и фотонапряжения при разомкнутой цепи  $\phi_{ph}^{o.c}$  (0,3-

0,7 В при прямом солнечном освещении, т.е.  $\approx 100 \text{ мВт/см}^2$ ). Чтобы не снижать заметно фактор заполнения  $f$ , омическое падение напряжения  $i_{sh,c}R$  должно быть по порядку величины меньше, чем  $\phi_{ph}^{o,c}$ . Отсюда следует, что полное (последовательное) сопротивление элемента  $R$  не должно заметно превышать 1 Ом, что достижимо при использовании полупроводниковых материалов с удельным сопротивлением порядка 0,01-10 Ом·см (и конечно, при отсутствии заметного сопротивления токоподводов и перенапряжения электрохимической реакции).

Для снижения последовательного сопротивления можно использовать в качестве фотоэлектродов двухслойные (например, эпитаксиальные) полупроводниковые структуры, в которых внешний слой толщиной несколько микрон имеет относительно высокое удельное сопротивление (1-10 Ом·см), обеспечивающее оптимальное соотношение между  $L_{sc}$  и  $\alpha^{-1}$ , а основная часть (подложка), не участвующая непосредственно в поглощении света и разделении зарядов, изготовлена из низкоомного материала (сотые и тысячные доли Ом·см) - так называемые  $p^+$ - $p$ - и  $n^+$ - $n$ -структуры. Зонная диаграмма подобного фотокатода изображена на рис. 10.

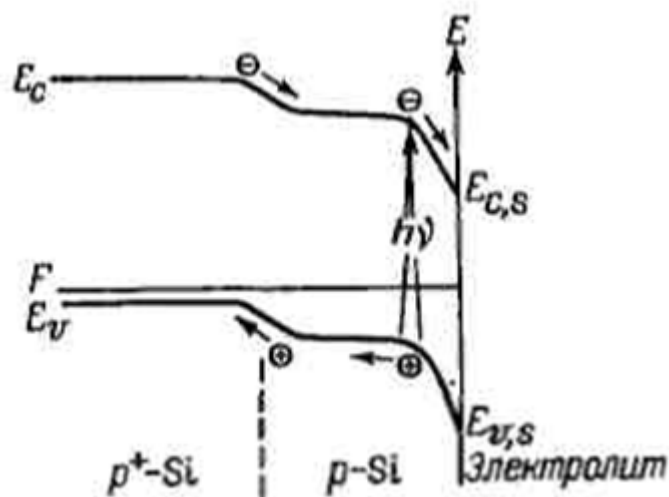


Рис. 10. Зонная энергетическая диаграмма фотокатода с  $p^+p^-$  - структурой

Поглощение света и фотогенерация носителей происходит в менее сильно легированной наружной  $p$ -области внутренней сильно легированная  $p^+$ -область служит подложкой и омическим контактом.

### 2.3 Прямое преобразование солнечной энергии в электрическую

Солнечный элемент представляет собой две тонкие пластинки кристаллического кремния (монокристаллические или поликристаллические), соединенные между собой (как два прозрачных листа бумаги). Солнечный свет, падая на верхнюю пластину, выбивает из кристалла кремния электроны, посылая их в другую пластинку. При этом создается постоянный электрический ток, который необходимо преобразовывать в переменный. В

отдельной пластинке ток получается очень малой мощности, поэтому большое количество пластинок объединяют в панели, которые производят 30-100 ватт.

Далее несколько панелей соединяются кабелями в блоки, которые устанавливаются на крышах, подставках или полках, где больше всего солнечного света. Преимущество солнечных элементов (батарей, станций) – их бесшумность, неисчерпаемость источника энергии, отсутствие движущихся деталей, бездефицитность материалов, из которых они изготавливаются (кремний, стекло, пластик и др.), простота и быстрота установления, обслуживания, замены, расширения (увеличения количества блоков), простота ухода. Любое количество солнечных элементов может быть установлено в пустынях, на окраинах земель, вдоль автотрасс и железных дорог, вдоль трубопроводов, на верхушках крыш и т.д. Их можно использовать на небольших энергетических станциях (для электропитания водоподъемных насосов, телекоммуникационных систем, катодной защиты трубопроводов, в домашнем хозяйстве и т.д.), комбинируя производство электричества в солнечные дни – с помощью гелио-блоков, а в сильно пасмурные дни – с помощью газовых турбин. Солнечные батареи практически не производят загрязнения окружающей среды, не нарушают землю, могут работать и в облачные дни. Мощность солнечных батарей, серийно выпускаемых промышленностью, –  $50 \div 250$  Вт. На солнечных фотоэлектрических станциях (см. рис. 11) солнечные батареи используются при сборке фотоэлектрических генераторов. Срок службы такой станции –  $20 \div 30$  лет, эксплуатационные затраты минимальны.

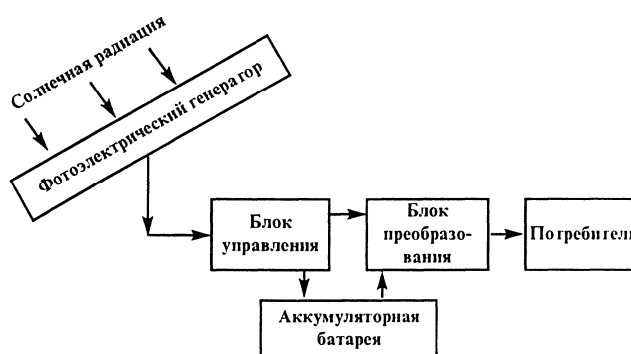


Рисунок 11 – Схема солнечной фотоэлектрической установки

Единственным недостатком солнечных батарей пока остается их сравнительно высокая стоимость (8-12 центов за киловатт-час), но многими компаниями ведутся работы по удешевлению стоимости изготовления солнечных элементов. Германская компания успешно испытала гелиоэлектрическое окно, разрабатываются технологии установки солнечных элементов на фасадах зданий и сооружений. Комплексы солнечных элементов – идеальная технология для электрификации сельских местностей. В Индии установлены солнечные батареи в 38000 деревень, в Зимбабве – в 2500 деревень. На крышах домов в Южной Африке, Шри Ланке, Доминиканской

республике и других слабо развитых странах установлено более 200000 комплексов солнечных элементов, в Норвегии – 50000, в США – около 100000.

Специалисты предполагают, что к 2050г. солнечные элементы будут давать около 30% (в некоторых странах, в том числе США – до 50%) от общей вырабатываемой в мире электроэнергии. Лучшие технологии по производству солнечных элементов разработаны в Германии, Японии, Италии. Наиболее высококачественные с высоким КПД фотоэлектрические солнечные элементы применяются в космонавтике. Они – наиболее дорогие, т.к. изготовлены из монокристаллического кремния. Более дешевые, изготавливаемые из поликристаллического кремния, широко применяются для наземных нужд.

В бывшем СССР первая опытная гелиобашня (“Солнечная электростанция” – СЭС-5) была построена в Крыму, в районе п-ова Казантип (пос. Щелкино), в 1985г. Ее мощность составляла 5 МВт и стоимость сооружения была очень высокой, как и “Solar-1” в США. Станция эффективно проработала 6 лет, прекратив свое существование после распада СССР. В 1988г. предполагалось на базе СЭС-5 спроектировать более мощную солнечную станцию – на 100 МВт, но эти работы также не состоялись. СЭС-5 представляла собой металлическую башню высотой 89 м с котлом-парогенератором на вершине. Вокруг башни было установлено 1600 гелиостатов – квадратных зеркал поперечником 5 метров, смонтированных на фундаменте из 6400 железобетонных свай. Зеркала по специальной программе с помощью компьютерного комплекса следили за солнцем, двигаясь синхронно светилу по горизонтальной и вертикальной осям и фокусируя отраженные лучи на поверхности парогенератора. Нагреваясь до 250-300 °С, вода в последнем превращалась в пар и по трубопроводам направлялась в турбину, установленную в машинном зале. Здесь вырабатывалась электроэнергия. Ночью и в пасмурную погоду рабочий режим СЭС-5 поддерживался аккумулятором-резервуаром с 400 тоннами горячей воды ( $t^{\circ}=300^{\circ}-120^{\circ}\text{C}$ ).

В настоящее время в США ведутся работы над проектом получения солнечной энергии из космоса. Американское космическое агентство НАСА изучает возможности запуска спутников, предназначенных для поставки на Землю к 2017г. солнечной энергии. Проект “Сан Тауэр” предполагает запуск на орбиту высотой 12 тыс. км над экватором целой серии спутников, каждый из которых должен вырабатывать от 200 до 400 МВт энергии. Второй проект – “Солор диск” предполагает выработку спутниками энергии в количестве до 5 гигаватт. К реализации проектов, которые считаются весьма перспективными, привлекаются и государственные, и частные инвесторы.

Над подобными проектами работают также ученые Германии и Франции.

Все чаще солнечные элементы используются для электродвигателей в автомобилях (США, Германия, Япония), на яхтах, небольших летательных аппаратах типа планеров.

## 2.4 Полупроводниковые материалы фотоэлементов

Полупроводники представляют собой класс кристаллических материалов, не относящихся ни к проводникам, ни к изоляторам. При комнатной температуре их удельное сопротивление лежит в диапазоне приблизительно от  $10^{-3}$  до  $10^3$  Ом·см, что больше удельного сопротивления металлов (менее  $10^{-4}$  Ом·см) и меньше удельного сопротивления изоляторов (свыше  $10^9$  Ом·см). Практически удельное сопротивление полупроводников, применяемых для изготовления солнечных элементов, лежит в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^2$  Ом·см.

Полупроводник в качестве материала электрохимической ячейки имеет следующие основные особенности:

низкую концентрацию свободных носителей, вследствие чего внешнее электрическое поле глубоко проникает в электродную фазу, образуя в приконтактной области слой пространственного заряда;

наличие двух видов свободных носителей-электронов и положительных дырок,- причем и те и другие могут вступать в электродные реакции.

Основной материал для массового производства ФЭП сегодня — кристаллический кремний. Из подложек, изготовленных на его основе, производится более 80% всех солнечных элементов. Несмотря на не самую лучшую поглощающую способность, кремний имеет ряд преимуществ над другими полупроводниками: 1) кремний широко распространен в земной коре в форме оксида кремния, 2) кремний нетоксичен и неактивен, поэтому не вносит дисбаланс в окружающую среду, 3) кремниевые технологии хорошо изучены в микроэлектронной промышленности. Однако сейчас все более широкое применение находят и другие материалы.

Оптимальными материалами для солнечных ФЭП являются соединения  $A^{III}$  и  $B^V$  в первую очередь арсенид галлия (GaAs). Полупроводники бывают р- и n-типа. При изготовлении кремния р- или n-типа, используемого для создания солнечных элементов (а также транзисторов и других полупроводниковых приборов), в расплав кремния добавляют определенное количество той или иной примеси. Этот процесс называется легированием. Кремний n-типа получают, добавляя в расплав кремния элемент V группы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева — фосфор, который имеет пять электронов на внешней электронной оболочке, а элемент IV группы — только четыре электрона. Атом фосфора, случайно попавший в кремний в процессе выращивания кристалла, занимает место атома кремния в кристаллической решетке и передает ей дополнительный электрон. Поэтому элементы V группы называются *донорными примесями*.

Для получения кремния р-типа в расплав кремния добавляют примесь р-типа элементов III группы, например бора. Атом бора имеет три электрона на внешней электронной оболочке, на один электрон меньше, чем атом кремния, который он замещает. Положительный заряд, образовавшийся из-за отсутствия электрона, получил название дырки. Поэтому примеси р-типа называются *акцепторными примесями*.

Электроны и дырки могут свободно передвигаться по объему полупроводника. Электрон может занимать место дырки. Этот процесс называется рекомбинацией. Однако на месте прежнего пребывания электрона возникает новая дырка. Под действием электрического поля электроны движутся в одном направлении, а дырки — в противоположном.

Предельный КПД солнечного элемента логарифмически растет при увеличении интенсивности освещения, что определяется соответствующим ростом фото-ЭДС. Это определяет интерес к использованию для ФЭП солнечного излучения, концентрированного более чем в 1000 раз. Однако при этом возникает проблема, обусловленная резким возрастанием токов в ФЭП и соответствующим возрастанием потерь мощности на внутреннем сопоставлении.

Внедрение солнечных ФЭП с концентраторами в практику во многом зависит от разработки дешевых и простых систем слежения за Солнцем, а также от разработки недорогих концентраторов, стабильных при длительной эксплуатации в неблагоприятных климатических условиях, что является сложной технической задачей.

В качестве отражающего покрытия солнечных концентраторов используется, как правило, алюминий, который имеет наиболее высокий интегральный коэффициент отражения в диапазоне волн солнечного спектра, хотя в некоторых случаях применяется и серебро.

Для защиты отражающего покрытия от внешних воздействий на него наносят пленки  $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др. При выборе защитного покрытия должны учитываться спектральные характеристики преобразователя солнечной энергии, так как, например, пленки из  $\text{SiO}$  и  $\text{SiO}_2$  значительно снижают отражательную способность зеркал в коротковолновой области спектральной чувствительности солнечных элементов.

Для пленочных космических концентраторов используются металлизированные полимерные пленки различного химического состава. По совокупности свойств наиболее подходящим и в космических конструкциях являются пленки из майлара и кантона.

Возможности эффективного применения на космических аппаратах (КА) концентраторов в значительной степени определяются их способностью длительное время работать в условиях космической среды, сохраняя высокие оптико-энергетические характеристики.

За двадцать лет промышленного использования в основном в качестве бортовых источников для космических аппаратов ФЭП получили достаточно широкое развитие. Для наиболее освоенного типа кремниевых ФЭП достигнутые в эксплуатации значения КПД составляют около 15%. Однако сегодня ФЭП все еще очень дороги.

В последнее время для изготовления фотоэлементов стало возможным использование ряда новых материалов. Один из наиболее перспективных - аморфный кремний, который в отличие от кристаллического не имеет регулярной структуры. Для аморфной структуры вероятность поглощения

фотона и перехода в зону проводимости больше. Таким образом, по поглощательной способности этот материал значительно превосходит кристаллический кремний. Для нужд полупроводниковой энергетики его можно использовать в виде тонких, толщиной около 0,5 мкм, пленок. Поскольку на элементы из аморфного кремния расходуется меньше материала и технология их изготовления проще, они дешевле.

Другим достижением в технологии тонкопленочных солнечных элементов стало получение многослойных элементов, позволяющих охватить большую часть спектра солнечного излучения. Так, например, верхний слой такого материала может собирать свет из синей части спектра, позволяя красному свету проходить к тому слою, который более эффективен именно в этой области спектра.

Герметический блок из элементов, соединенных между собой в промышленных условиях, называется фотоэлектрическим модулем. Несколько модулей образуют батарею. Высокая стоимость солнечных элементов - это именно то, что задерживает развитие крупных фотоэнергетических установок. Стоимость электроэнергии, получаемой от такого модуля, исключительно высока: 3 долл. за 1кВт/ч. Стоимость электроэнергии, производимой электростанциями, работающими на ископаемом и ядерном топливе составляет от 8 до 10 центов за 1 кВт/ч. Такая разница побудила приложить огромные усилия к снижению стоимости энергии, вырабатываемой солнечными установками. Исследования охватили материалы, из которых изготавливаются солнечные элементы, структуру элементов и процессы массового производства.

Эффективность современных кремниевых (а также на основе арсенида галлия) фотоэлементов достаточно высока (их КПД достигает 10-20%), а чем выше КПД, тем меньше требуемая площадь солнечных батарей, которая даже в малой энергетике составляет десятки квадратных метров. Последнее важное направление в развитии солнечной энергетики - создание более дешевых и удобных фотопреобразователей: ленточных поликристаллических кремниевых панелей, тонких пленок аморфного кремния, а также других полупроводниковых материалов. Самым высокоэффективным из них оказался алюминий-галлий -мышьяк, его промышленная разработка только начинается. Большую перспективу открывают гетероструктурные полупроводники, эффективность которых в два раза выше, чем простых кремниевых образцов.

На гелиоэнергетические ресурсы территории оказывают влияние географические и климатические характеристики: продолжительность светового дня; средняя месячная и годовая продолжительность солнечного сияния; средние месячные и годовые характеристики прозрачности атмосферы и ряд других.

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

#### 3.1 Математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную приемную площадку

В научных исследованиях большую роль играют гипотезы, т. е. определенные предсказания, основывающиеся на небольшом количестве опытных данных, наблюдений, догадок. Замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели называется моделированием. Таким образом, моделирование может быть определено как представление объекта моделью для получения информации об этом объекте путем проведения экспериментов с его моделью.

Существующие и проектируемые системы можно эффективно исследовать с помощью математических моделей (аналитических и имитационных), реализуемых на современных ЭВМ, которые в этом случае выступают в качестве инструмента экспериментатора с моделью системы.

Солнечная энергия распространяется в космосе в виде так называемого прямонаправленного потока солнечного излучения СИ, характеризующегося собой в виде прямой линии, связывающей собой Солнце (источник СИ) и приемную площадку ПП. В виду наличия атмосферы и подстилающей поверхности Земли на произвольно-ориентированную приемную площадку СИ поступает уже в виде трех потоков солнечной энергии: прямая  $R_{пр}$  (t), диффузная или рассеянная  $R_{д}$  (t) и отраженная  $R_{от}$  (t) от поверхности Земли (см. рис. 12).

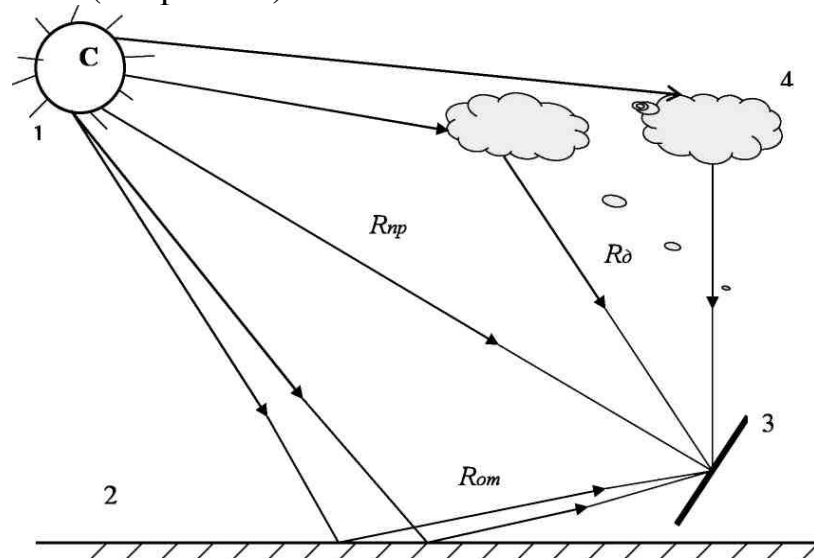


Рисунок 12 – Основные составляющие солнечного излучения на поверхности Земли: 1- Солнце, 2 –поверхность Земли, 3 – приемная площадка, 4 – облака, аэрозоли, пыль

Т.е. суммарный поток СИ на приемную площадку  $R_{\Sigma}(t)$  на поверхности Земли будет в каждый момент времени  $t$  складываться как:

$$R_{\Sigma}(t) = R_{np}(t) + R_o(t) + R_{om}(t), \quad (30)$$

где  $R_{np}(t)$  – прямое СИ, реализуемое в виде направленного потока СИ вдоль прямой линии, связывающей собой Солнце и приемную площадку СИ на земле;

$R_o(t)$  – диффузное СИ, реализуемое за счет направленного СИ, рассеянного в атмосфере земли облаками, а аэрозолями, пылью и т.д.;

$R_{om}(t)$  – отраженная от поверхности земли часть направленного СИ.

Если для приемной площадки в космосе  $R_{\Sigma}(t)$  определяются только за счет направленного СИ (т.е.  $R_{np}(t)$ ) то на поверхности Земли  $R_{\Sigma}(t)$  зависит от многих факторов, и, в первую очередь, от геометрического расположения приемной площадки относительно Солнца. Для пояснения сказанного на рис. 13 представлена произвольно-ориентированная наклоненная к югу плоская приемная площадка. Основные обозначения на рис. 13:  $S$  – горизонтальная площадка на земле где расположена произвольно-ориентированная плоская приемная площадка  $F$ , наклоненная к Югу под углом  $\beta^0$ ,  $OO$  – линия пересечения плоскостей  $F$  и  $S$ ;  $AD \in S$  и  $AD \perp OO$ ;  $AC \in F$  и  $AC \perp OO$ ;  $AE \perp F$ ;  $AB \in S$ ;  $G$  – солнце;  $АН \in S$  и  $АН$  является проекцией  $AG$  на  $S$ .

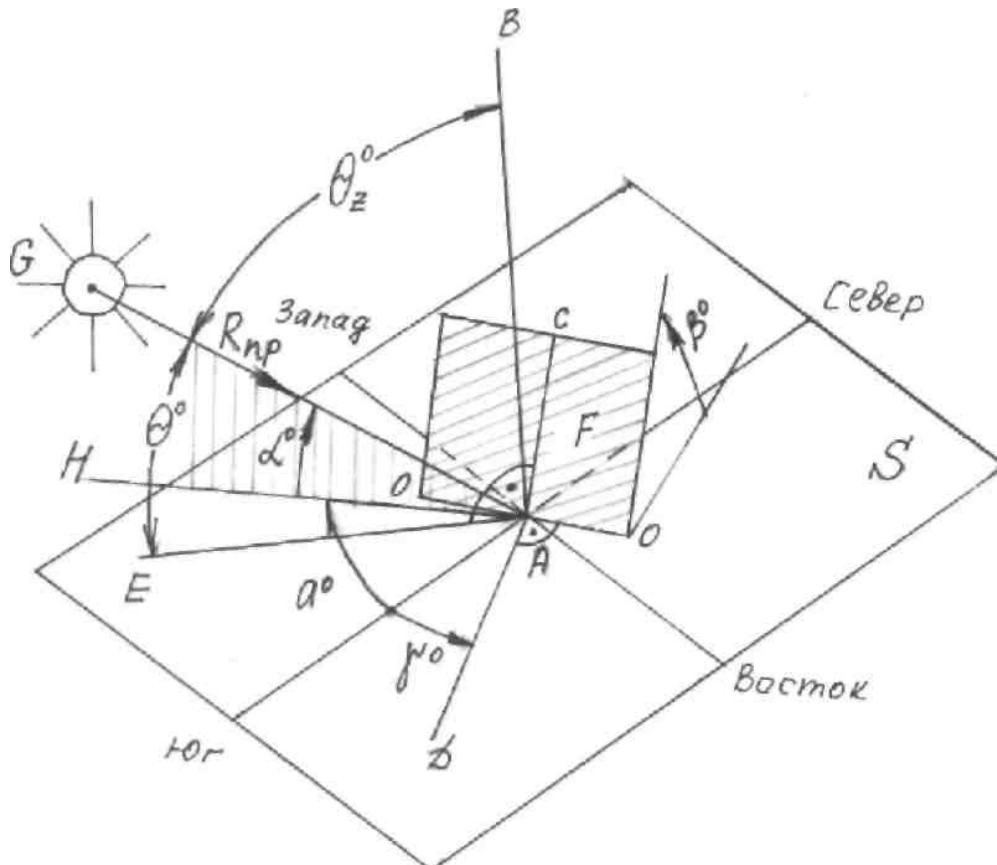


Рисунок 13 – Геометрия приемной площадке на Земле и Солнца

Соответственно определяются следующие характерные углы для приемной площадки  $F$  по отношению к  $R_{np}(t)$ :

$\theta^0$  – угол падения солнца, равный углу между  $GA$  и перпендикуляром к  $F$ , т.е. угол между направлением на Юг и перпендикуляром  $AD$  к  $OO$  ( $\gamma^0 = 0$  для площадки, ориентированной строго на Юг;  $\gamma^0 < 0$ , т.е.  $-90 < \gamma^0 < 0$ ) для площадки, ориентированной к западу;  $\alpha^0$  – высота солнца над горизонтом или угол между направлением  $GA$  и его проекцией на плоскость (т.е.  $HA$ );  $a^0$  – азимут солнца или угол между направлением на Юг и проекцией  $GA$  и плоскостью  $S$  (т.е.  $HA$ ); знаки  $a^0$  и  $\gamma^0$  совпадают между собой.

Соотношение между  $\theta^0$  и  $\theta_z^0$  для горизонтальной ( $\beta^0 = 0$ ) и наклоненной приемной площадки ( $\beta^0 > 0$ ) показано на рис. 14. Очевидно, для случая, когда  $\beta^0 = 0$  углы  $\theta^0$  и  $\theta_z^0$  совпадают между собой, т.е.  $\theta^0 = \theta_z^0$ . На рис. 14 принято, что высота Солнца в случае а) и б) одинаковы, т.е.  $\alpha_1^0 = \alpha_2^0$ . Однако, количество солнечной энергии, поступающей на приемную площадку  $R(t)$ , определяемое соотношением

$$R(t) = R_{np}(t) \cdot \cos \vartheta^0(t), \quad (31)$$

будет различным. Очевидно, что для случая б) значение  $R(t)$  будет больше, чем для случая а). В целом можно констатировать то, что приход прямого СИ на приемную площадку во-многом определяется значением  $\theta^0(t)$ .

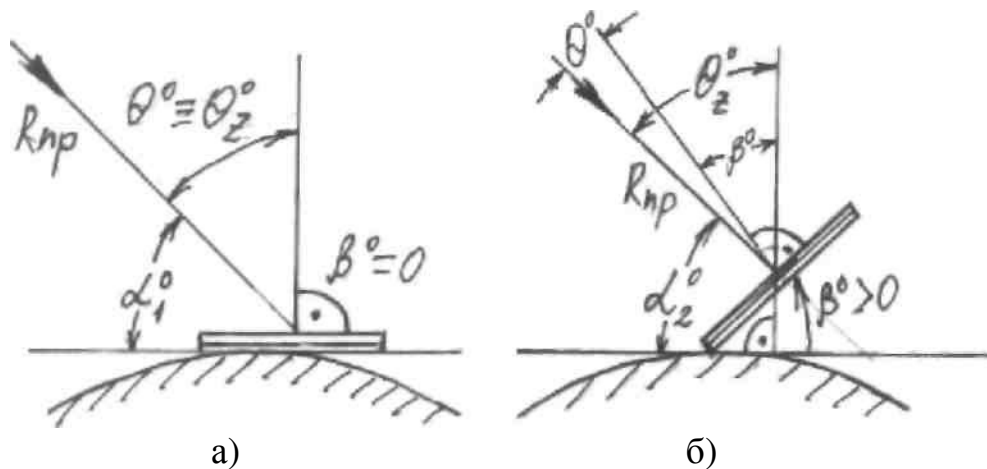


Рисунок 14 – Соотношение  $\theta^0$  и  $\theta_z^0$  для горизонтальной (а) и наклонной (б) приемной площадки

Максимальный приход прямого СИ на приемную поверхность в течение любых календарных суток года ( $n_i$ ) при непрерывном времени  $t$ . Подобная задача реализуется при условии, когда приемная поверхность ПП постоянно ориентирована на Солнце, что соответствует условию (см. рис. 15):

$$\theta_z^0 \equiv \beta^0 = 90^\circ - \alpha^0, \quad (32)$$

Известно, что высоту Солнца ( $\alpha^0$ ) можно определить в любой момент времени суток по формуле:

$$\sin \alpha^0(t) = \sin \varphi^0 \cdot \sin \delta^0(n_i) + \cos \varphi^0 \cdot \cos \omega^0(t) \cdot \cos \delta^0(n_i), \quad (33)$$

С учетом (32) и (33) значения  $\alpha^0(t, n_i)$  можно найти по формуле:

$$\sin \alpha^0(t, n_i) = \sin(90^\circ - \beta^0(t, n_i)) = \cos \beta^0(t, n_i), \quad (34)$$

$$\beta(t, n_i) = \arccos(\sin \varphi^0 \cdot \sin \delta^0(n_i) + \cos \varphi^0 \cdot \cos \delta^0(n_i) \cdot \cos \omega^0(t, n_i)), \quad (35)$$

где  $\varphi$  - широта местности;

$\delta$  - склонение (угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора);

$\beta$  - угол между рассматриваемой плоскостью и горизонтальной плоскостью;

$\omega$  - часовой угол (отсчитанный от солнечного полдня, угловое смещение Солнца относительно местного меридиана, обусловленное вращением Земли и соответствующее  $15^\circ$  в час).

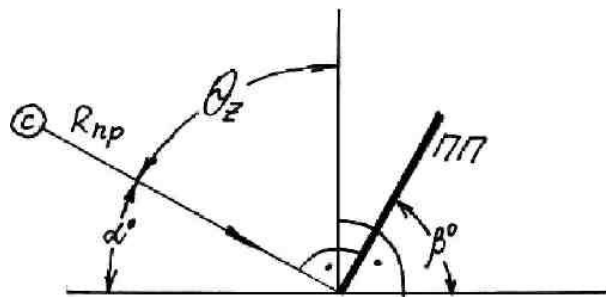


Рисунок 15 – Оптимальная ориентация приемной площадки к прямому СИ

Для максимизации прихода прямого СИ на ПП необходимо, чтобы угол падения Солнца  $\theta^0$  был равен  $90^\circ$ .

Изложена модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную произвольно ориентированную поверхность. Эта модель позволяет рассчитывать потоки коротковолновой радиации в многокомпонентной замутненной облачной атмосфере с учетом многократного рассеяния и поглощения. Поток прямой солнечной радиации на произвольно ориентированную наклонную поверхность определяется формулой:

$$S_s = S_m \cos i, \quad (36)$$

$$\cos i = \cos \alpha \sin h_C + \sin \alpha \cos h_C \cos \psi, \quad (37)$$

где  $S_m$  – поток прямой солнечной радиации у земной поверхности, приходящий на перпендикулярную к лучам поверхность  $1353 \text{ Вт/м}^2 \pm 1,5 \%$ ;  $\cos i$  – косинус угла падения солнечных лучей на заданную поверхность;  $\alpha$  – угол наклона поверхности по отношению к горизонтальной плоскости;  $h_C$  – высота Солнца;  $\psi = \psi_C - \psi_S$ ;  $\psi_C$  – азимут Солнца;  $\psi_S$  – азимут проекции нормали к поверхности на горизонтальную плоскость, азимуты отсчитываются от плоскости меридиана, положительны при отсчете от точки юга в направлении часовой стрелки.

Высота и азимут солнца вычисляются по формулам:

$$\cos(\psi_C) = \frac{\sin h_C \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h_C \cos \varphi}, \quad (38)$$

$$\sin(\psi_S) = \frac{\cos \delta \sin \theta}{\cos h_C}. \quad (39)$$

$$\sin h_C = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \theta,$$

где  $\delta = 23,45 \cdot \sin(360 \cdot \frac{284+n}{365})$  – склонение солнца;

$n$  – номер текущего дня года;  $\varphi$  – географическая широта;  $\theta$  – часовой угол Солнца в данный момент времени, отсчитываемый от момента истинного полдня.

С учетом (38) и (39) :

$$S_s = S_m [\cos \alpha (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \theta) + \sin \alpha \{ \cos \psi_S (tg \varphi [\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \theta] - \sin \delta \sec \varphi) + \sin \psi_S \cos \delta \sin \theta \}]. \quad (39)$$

Формулу (39) удобно записать в следующем виде:

$$S_s = S_m (A_1 + B_1 \cos \theta + C_1 \sin \theta), \quad (40)$$

$$A_1 = \cos \alpha \sin \varphi \sin \delta + \sin \alpha \cos \psi_S (tg \varphi \sin \varphi \sin \delta - \sin \delta \sec \varphi)$$

$$B_1 = \cos \alpha \cos \varphi \cos \delta + \sin \alpha \cos \psi_S \cdot \sin \varphi \cos \delta \sin \delta \sec \varphi$$

$$C_1 = \sin \alpha \sin \psi_S \cos \delta,$$

Часовые углы, определяющие моменты начала и конца освещения наклонной поверхности, являются корнями уравнения:

$$A_1 + B_1 \cos \theta + C_1 \sin \theta = 0, \quad (41)$$

В формуле (13)  $S_s$  и  $S_m$  – мгновенные значения потока солнечной радиации. Для перехода к осредненным за сутки потокам солнечной радиации осредняем  $\cos i$ :

$$I_1 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} (A_1 + B_1 \cos \theta + C_1 \sin \theta) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{t_1}^{t_2} (A_1 + B_1 \cos \theta + C_1 \sin \theta) d\theta, \theta = \frac{2\pi t}{T}, \quad (42)$$

где  $t_1, t_2$  – корни уравнения (41).

Так как модель дает средние суточные значения интенсивности солнечной радиации на горизонтальной поверхности  $S_h$ , то конечная формула для расчета будет следующей:

$$S_S^c = S_h^c \frac{I_1}{\bar{h}_c}, \quad (43)$$

$$\text{где } \bar{h}_c = \frac{1}{T} \int_{-t_0}^{t_0} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \theta) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-t_0}^{t_0} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \theta) d\theta$$

определяет осредненное за сутки значение синуса высоты Солнца;  $S_h^c$  – среднее суточное значения интенсивности прямой солнечной радиации на горизонтальной поверхности;  $S_S^c$  – среднее суточное значения интенсивности прямой солнечной радиации на наклонной поверхности, ориентация которой задается азимутом  $\psi_S$ .

Радиация, падающая на наклонную поверхность, может быть представлена в виде трех составляющих,

$$Q_S = S_S + D_S + R_S, \quad (44)$$

$$\text{где } D_S = \frac{D_h(1 + \cos \alpha)}{2}, \quad R_S = \frac{Q_h \cdot A \cdot (1 - \cos \alpha)}{2}. \quad (45)$$

где  $D_S, R_S$  – диффузная радиация, приходящая на наклонную поверхность, рассеянная атмосферой и земной поверхностью соответственно,  $D_h$  – рассеянная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность;  $Q_h$  – суммарная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность;  $A$  – среднее месячное альбедо прилегающих участков земной поверхности.

Соотношения (45) справедливы в случае изотропности падающих потоков  $D_h$  и  $Q_h$ . Необходимо отметить, что изотропное приближение приводит к ошибкам при оценках потоков радиации на наклонные поверхности в условиях безоблачного неба для поверхностей как обращенных в сторону Солнца (систематическое занижение), так и обращенных в сторону, противоположную Солнцу (систематическое завышение). При наличии облачности ошибки уменьшаются, но не для всех ориентаций одинаково. При сплошной облачности допущение изотропности дает удовлетворительные результаты. Так как в реальных условиях балл облачности порядка 5, то данное приближение может использоваться.

### 3.2 Расчет эффективного значения плотности потока солнечного излучения

Эффективное значение плотности потока солнечного излучения является действительным эффективным уровнем освещенности активной поверхности солнечного элемента:

$$S' = (S_1 \cdot D^2) \cdot F_\gamma \cdot \cos G, \quad (46)$$

где  $S$  – плотность потока солнечного излучения, выраженная в единицах солнечных постоянных;

$D$  – расстояние от батареи до Солнца, выраженное в астрономических единицах (а.е.);

$F_\gamma$  – коэффициент, учитывающий оптическую прозрачность покрытия солнечного элемента;

$G$  – угол падения излучения, град.

**Вольт-амперная характеристика солнечного элемента со стеклянным покрытием.** Для непокрытых солнечных элементов эти характеристики сдвигаются параллельно оси тока до тех пор, пока ток короткого замыкания элемента со стеклянным покрытием не станет равным:

$$I_{кз.п} = I_{кз.н} F_{п.э.}, \quad (47)$$

где  $I_{кз.н}$  – ток короткого замыкания непокрытого солнечного элемента с радиационным повреждением;

$F_{п.э.}$  – коэффициент, учитывающий изменение  $I_{кз}$  при нанесении покрытия. Этот коэффициент обычно отличается от единицы (на несколько сотых).

Остальные три параметра солнечного элемента после нанесения стеклянного покрытия можно представить в виде:

$$\begin{aligned} I_{опт.п} &= I_{опт.н} + I_{кз.п} - I_{кз.н} \\ U_{опт.п} &= U_{опт.н} \\ U_{xx.п} &= U_{xx.н} \end{aligned} \quad (48)$$

где  $I_{опт}$  – ток при максимальной мощности солнечного элемента;

$U_{опт}$  – напряжение при максимальной мощности солнечного элемента;

$U_{xx}$  – напряжение холостого хода.

Выходные параметры наземных плоских модулей солнечных батарей (защищенных общим стеклом) аналогичны параметрам отдельных солнечных элементов со стеклянными покрытиями. Их различие заключается только в том, что каждый модуль состоит из нескольких солнечных элементов.

**Влияние изменения плотности потока солнечного излучения на вольт-амперные характеристики солнечного элемента.** Эти характеристики солнечного элемента с заданной степенью радиационного повреждения сдвигаются при изменении плотности потока солнечного излучения вдоль осей тока и напряжения на  $\Delta I_1$  и  $\Delta U_1$

$$\Delta I_1 = (S' - S)I_{кз.н}, \quad (49)$$

$$\Delta U_1 = \Delta I_1 R_n, \quad (50)$$

где  $I_{кз.н}$  – исходный ток короткого замыкания солнечного элемента со стеклянным покрытием, т. е. до изменения плотности потока излучения;

$R_n$  – последовательное сопротивление элемента;

$S'$  – эффективное значение плотности потока солнечного излучения;

$S$  – плотность потока солнечного излучения, при которой проводились испытания солнечных элементов (до изменения плотности потока излучения).

При уменьшении плотности потока излучения ( $S' \ll S$ )  $\Delta I_1$  имеют отрицательный знак, а  $\Delta U_1$  – положительный. Это приводит к уменьшению тока  $I_{кз}$ , а также к небольшому сдвигу характеристики по оси напряжения в сторону больших значений, несмотря на то что действительное напряжение холостого хода будет уменьшаться по следующему закону:

$$V_s = \kappa \lg \frac{S'}{S}, \quad (51)$$

где  $k$  зависит от типа солнечного элемента. С изменением плотности потока солнечного излучения параметры солнечного элемента (имеющие дополнительный индекс  $S$ ) изменяются следующим образом:

$$I_{кзS} = I_{кз.н} + \Delta I_1, \quad (51)$$

$$I_{онм.S} = I_{онм.н} + \Delta I_1, \quad (52)$$

$$U_{онм.S} = U_{онм.н} + \Delta U_1 + \Delta U_s, \quad (53)$$

$$U_{xx.S} = U_{xx.н} + \Delta U_1 + \Delta U_s, \quad (54)$$

**Влияние рабочей температуры на вольт-амперные характеристики солнечного элемента.** Теперь необходимо, чтобы эта характеристика соответствовала действительной рабочей температуре солнечного элемента Граб- Вольт-амперная характеристика сдвигается по осям тока и напряжения на  $\Delta I_2$  и  $\Delta U_2$ :

$$\Delta I_2 = \beta_1 I_{\kappa 3} (T_{\text{раб}} - T_0), \quad (55)$$

$$\Delta U_2 = \beta_v (T_{\text{раб}} - T_0), \quad (56)$$

где  $\beta_1$  – температурный коэффициент тока, выраженный в обратных градусах Цельсия;

$\beta_v$  – температурный коэффициент напряжения, выраженный в тех же единицах;  $I_{\kappa 3}$  – ток короткого замыкания солнечного элемента до изменения температуры;  $T_0$  – эталонная температура, при которой обычно проводят измерения исходных параметров солнечного элемента;

$\beta_1$  обычно имеет положительные значения,  $\beta_v$  – отрицательные.

С увеличением температуры ( $T_{\text{раб}} > T_0$ ) происходит увеличение  $I_{\kappa 3}$  и уменьшение  $U_{\text{хх}}$ .

Остальные четыре параметра солнечного элемента изменяются следующим образом:

$$I_{\kappa 3.T} = I_{\kappa 3.S} + \Delta I_2, \quad (57)$$

$$I_{\text{онм}.T} = I_{\text{онм}.S} + \Delta I_2, \quad (58)$$

$$U_{\text{онм}.T} = U_{\text{онм}.S} + \Delta U_1, \quad (59)$$

$$U_{\text{хх}.T} = U_{\text{хх}.S} + \Delta U_1, \quad (60)$$

**Вольт-амперные характеристики солнечного элемента после испытаний.** На этом этапе характеристика солнечного элемента изменяется в соответствии с конструктивным фактором  $F_{\text{кн}}$  и деградиационным фактором  $F_{\text{д}}$  связанным с циклическим изменением температуры. Наличие  $F_{\text{кн}}$  и  $F_{\text{д}}$  обычно свидетельствует об увеличении последовательного сопротивления солнечного элемента или модуля, что ведет к снижению максимальной выходной мощности солнечного элемента при неизменных значениях  $I_{\kappa 3}$  и  $U_{\text{хх}}$ . Поэтому желательно сместить точку  $I_{\text{опт}}$  и  $U_{\text{опт}}$  вольт-амперной характеристики на:

$$\Delta I_3 = -(F_{\kappa} F_{\text{д}})^{\frac{1}{2}}, \quad (61)$$

$$\Delta U_3 = -(F_{\kappa} F_{\text{д}})^{\frac{1}{2}}, \quad (62)$$

оставив  $I_{\kappa 3}$  и  $U_{\text{хх}}$  прежними. Четыре параметра солнечного элемента изменятся в этом случае следующим образом:

$$I_{\kappa 3.Д} = I_{\kappa 3.T}, \quad (63)$$

$$I_{\text{онм}.Д} = I_{\text{онм}.T} + \Delta I_3, \quad (64)$$

$$U_{\text{онм}.Д} = U_{\kappa 3.T} + \Delta U_3, \quad (65)$$

$$U_{\text{хх}.Д} = U_{\text{хх}.T}, \quad (66)$$

**Вольт-амперная характеристика солнечной батареи** рассчитывается на основании характеристик отдельных солнечных элементов в следующей последовательности:

1. Выходной ток отдельного элемента умножают на число параллельно соединенных элементов  $N_{пр}$  данной панели или лопасти.
2. Выходное напряжение включенных параллельно  $N_{пр}$  солнечных элементов умножают на число  $N_{пс}$  последовательно соединенных элементов.
3. Из полученного выходного напряжения панели вычитают падение напряжения на диодах  $V_d$  и соединительных проводах  $V_{п.}$
4. Суммируют значения выходных токов всех панелей и лопастей для одинаковых значений напряжений.

В результате выполненного в соответствии с перечисленными этапами расчета находят вольт-амперные характеристики солнечной батареи:

$$I_{кз.б} = I_{кз.д} N_{пр}, \quad (67)$$

$$I_{онт.б} = I_{онт.д} N_{пр}, \quad (68)$$

$$U_{онт.б} = U_{онт.д} N_{пс} - (U_d + U_n), \quad (69)$$

$$U_{хх.б} = U_{онт.д} N_{пс} - (U_d + U_n), \quad (70)$$

### **3.3 Комбинированная система электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии**

Разработка научного проекта на «Второй республиканский конкурс проектов по энергосбережению и альтернативным источникам энергии среди учащихся, студентов, молодых специалистов и ученых» г. Алматы, 2010 г. Конференция состоялась 10 февраля 2010 г.

Проект подготовлен совместно магистрантами гр. ЭЭ-21м Д.М. Мосияш, А.С. Ермензин и Р.Ж. Альназаров. Работа заслужила внимание организаторов конкурса и была отправлена в номинацию «Молодые ученые».

По итогам второго республиканского конкурса проектов по энергосбережению и альтернативным источникам энергии среди учащихся, студентов, молодых специалистов и ученых, был издан сборник с материалами участников. Участники конкурса награждены ценными призами и дипломами.

Цель работы заключается в использовании способов и средств взаимного замещения традиционных энергоресурсов энергией солнца и ветра, т.е. используя фотоэлектрические панели и ветрогенератор (см. рис. 16). С учетом местных метеорологических условий. Определена полезная удельная энергия ветра и солнца для Павлодарской области

Исходя из условий потребления электроэнергии лабораторией «Возобновляемая энергетика» 47,482 кВт·ч в день, необходимую мощность могут обеспечить:

- 10 солнечных панелей, номинальной мощностью 155 Вт каждая и суммарной площадью 12,88 кв.м.;
- ветрогенератор номинальной мощностью 1 кВт при скорости ветра 12,5 м/с. В целях достижения надежного бесперебойного электроснабжения лаборатории предусмотрен резерв, представляющий собой электрическую сеть, вводимый в действие устройством автоматического включения резерва – АВР.

Стоимость проекта составляет 1 907 950 тенге.

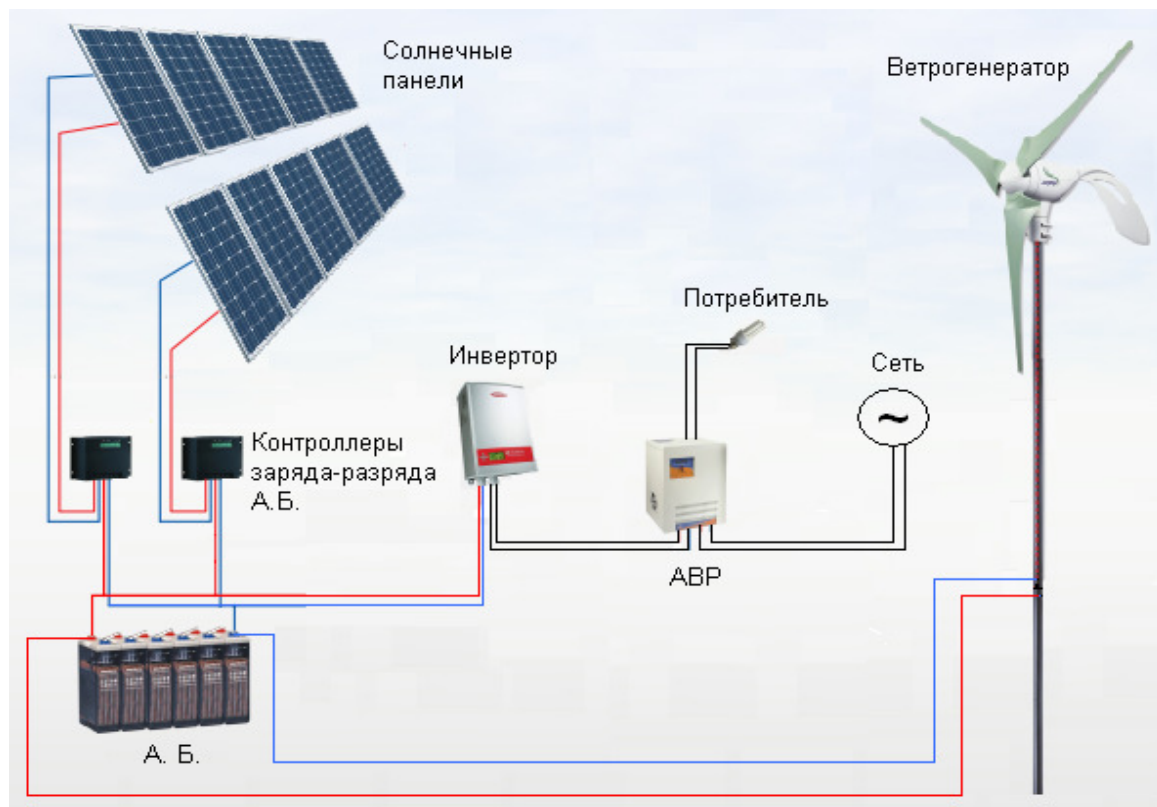


Рисунок 16 – Схема электроснабжения лаборатории

Возможность использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии можно оценить только при их совместном рассмотрении. Были проведены следующие расчеты:

- рассчитана потребляемая мощность, необходимая для нормального функционирования лаборатории, проведения учебных занятий и выполнения лабораторных работ (см. табл. 4);
- определены гелиоэнергетические, ветроэнергетические ресурсы Павлодарской области;
- выбрано необходимое количество солнечных панелей, и ветрогенератор;
- рассчитаны затраты на реализацию данного проекта.

Таблица 4 – Потребление электроэнергии в лаборатории возобновляемой энергетики

| Наименование потребителя                                                    | Кол-во | Потребление (Вт) | Часов работы в день | Тип нагрузки | Всего (Вт*ч/День) |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------|------------------|---------------------|--------------|-------------------|
| Освещение                                                                   | 36     | 18               | 8                   | ac           | 6220.8            |
| Компьютерная техника                                                        | 11     | 300              | 8                   | ac           | 31680             |
| Оргтехника                                                                  | 3      | 1408             | 1                   | ac           | 5068.8            |
| Проектор                                                                    | 1      | 880              | 2                   | ac           | 2112              |
| Прочее (лабораторные установки)                                             | 1      | 1000             | 2                   | ac           | 2400              |
| Суммарная мощность потребителей переменного тока, подключенных одновременно |        |                  |                     |              | 10052 Вт          |
| Общая потребность в электричестве за сутки                                  |        |                  |                     |              | 47481.60 Вт*ч     |
| Введите напряжение постоянного тока (обычно 12, 24 или 48 В)                |        |                  |                     |              | 24 Вольт          |

Солнечное излучение в различные периоды года на территории г. Павлодара, 52°18' широты, 76°57' долготы (см. рис. 17).

|             | Global irradi.<br>kWh/ml | Diffuse<br>kWh/ml | Temper.<br>°C | Wind vel.<br>m/s |
|-------------|--------------------------|-------------------|---------------|------------------|
| January     | 30.0                     |                   | -14.6         | 6.14             |
| February    | 45.9                     |                   | -12.8         | 2.54             |
| March       | 98.3                     |                   | -2.2          | 5.10             |
| April       | 138.1                    |                   | 9.1           | 6.98             |
| May         | 185.1                    |                   | 16.6          | 4.49             |
| June        | 193.9                    |                   | 20.9          | 4.58             |
| July        | 183.8                    |                   | 24.5          | 4.16             |
| August      | 150.6                    |                   | 20.0          | 3.85             |
| September   | 88.5                     |                   | 10.5          | 3.95             |
| October     | 62.2                     |                   | 6.6           | 2.17             |
| November    | 24.5                     |                   | 0.1           | 6.20             |
| December    | 20.4                     |                   | -11.7         | 4.70             |
| <b>Year</b> | <b>1221.4</b>            |                   | <b>5.6</b>    | <b>4.6</b>       |

Рисунок 17 - Метеоданные по г. Павлодару за 2008-2009 годы

Для создания локальных ветроэнергетических установок (ЛВЭУ) актуальна оценка ветрового потенциала и в городских условиях. Наиболее важным фактором, влияющим на количество ветровой энергии, которое ветроэнергетическая установка (ВЭУ) может преобразовать в электрическую, является скорость ветра. Энергия ветрового потока изменяется

пропорционально кубу скорости ветра и, например, если скорость ветра удваивается, то кинетическая энергия, полученная ротором ВЭУ, увеличивается в восемь раз, соответственно увеличивается и количество электрической энергии вырабатываемой ВЭУ.

Чтобы правильно выбрать площадку и мощность ЛВЭУ, необходимо иметь информацию о средней скорости ветра на конкретном участке территории.

Средняя скорость ветра в течение года используется для характеристики общего ветрового потенциала местности. Помимо значения средней скорости ветра существует еще ряд параметров, необходимых для определения ветрового потенциала: максимальная скорость ветра и количество последовательных дней (часов), когда скорость ветра ниже предельно допустимой и не превышает 2,5 м/с.

Точное измерение скорости ветра важно для планирования ветроэнергетических объектов. На скорость ветра большое влияние оказывают следующие факторы: неровность поверхности участка, находящиеся поблизости препятствия (деревья, различные строения), а также контуры местного ландшафта. Без корректировки расчетов и учета местных особенностей, при которых были проведены метеорологические измерения, трудно правильно определить ветровой потенциал участка.

С целью определения ветрового потенциала в условиях г.Павлодара, был произведен анализ собственных метеоданных за период с октября 2008 года по сентябрь 2009 год, автоматически регистрируемых анемометром в лаборатории возобновляемых источников энергии ИнЕУ.

Для этого была создана специальная установка, включающая в себя мачту, высотой 6 метров над уровнем крыш застройки, на которой был установлен комплекс приборов для контроля метеорологических характеристик: анемометр, измеряющий скорость ветра (м/с); пиранометр, служащий для измерения солнечного излучения ( $W/m^2$ ); гигрометр-термометр, измеряющий содержание водяного пара в воздухе – влажности атмосферы (%), а также температуры ( $^{\circ}C$ ).

Анализ полученных данных показал, что на территории г. Павлодара ветровой потенциал умеренный. На рисунке 18 показана гистограмма среднемесячных скоростей ветра, построенная по показаниям анемометра. Из гистограммы следует, что среднемесячная скорость ветра в зимне-весенний период времени больше, чем в летне-осенний период.

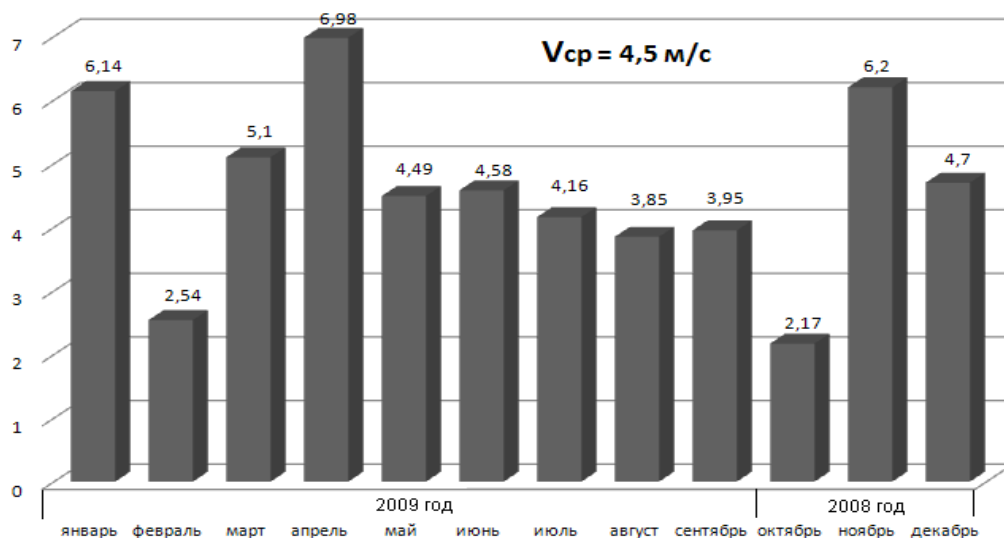


Рисунок 18 – Среднемесячные значения скорости ветра, м/с

Для ВЭУ малой мощности (до 5кВт) минимальный порог скорости ветра, при котором ВЭУ начинает вырабатывать электрическую энергию, составляет 2,5 м/с. Поэтому для правильной оценки энергии, которая может быть выработана с помощью ЛВЭУ, необходимо знать длительность «безветренных» часов.

На рисунке 19 изображен график суммарного количества часов в месяц, при котором скорость ветра не превышает минимально допустимую, за период времени с августа 2008 года по июль 2009 года. Исходя из данных гистограммы, можно с уверенностью сказать, что в году в среднем в течение суток скорость ветра не превышает 2,5 м/с на протяжении 8,5 часов.

Таким образом, в рассматриваемых городских условиях имеется достаточный ветроэнергетический потенциал, дающий возможность создания локальных источников энергии на основе эффективного применения ВЭУ.

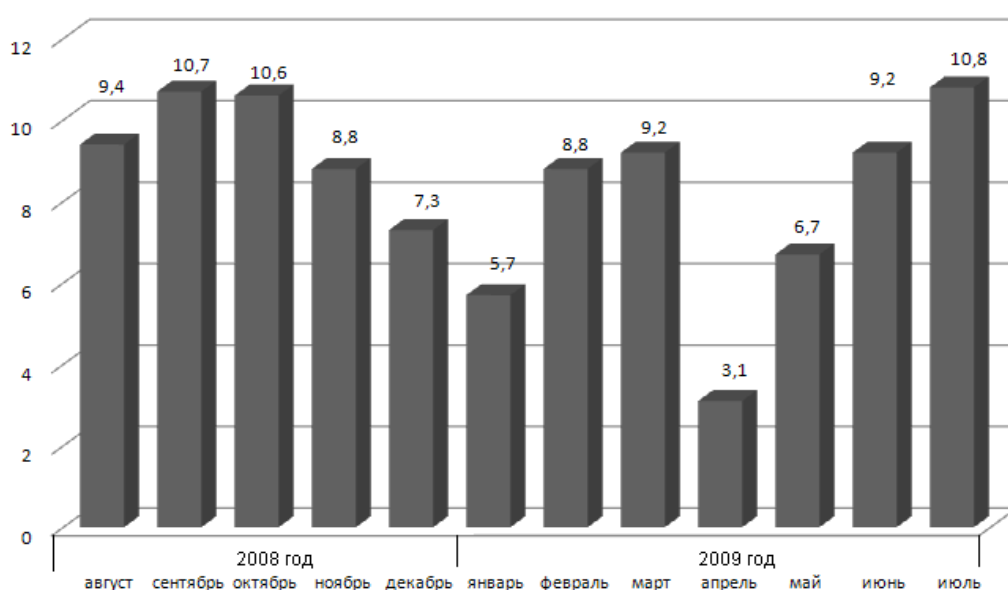


Рисунок 19 - Количество последовательных часов, когда скорость ветра не превышает 2,5 м/с



энергоснабжения традиционными источниками энергии с альтернативными источниками, а также снижением вредных выбросов в окружающую среду.

В работе использован комплексный подход исследования, включающий метод математической статистики, метод синтеза рациональной структуры энергопотребления, теорию математического моделирования и инженерного эксперимента.

Достоверность положений, результатов и выводов подтверждена формулировкой задачи исследования, сделанной исходя из анализа работы различных типов потребителей и энергоносителей; математическим обоснованием разработанных зависимостей.

*Реализация работы.* В Инновационном Евразийском Университете подобный проект реализован и работает по сегодняшний день, целью которого является электроснабжение компьютерных серверов и АТС.

Научная новизна исследования состоит в следующем: определены статистические характеристики, математические зависимости и оценен потенциальный ресурс солнечной и ветровой энергии.

Использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии может рассматриваться как самостоятельная часть общей системы электроснабжения. При этом следует учитывать, что солнечная энергия (при существующих условиях и техническом решении) может производить электрическую и тепловую энергию, ветровая энергия – электрическую и механическую (например, водоподъем).

К достоинствам, несомненно, относится то, что каждая из систем с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии исключает элементы, связанные с добычей, транспортировкой и переработкой органического топлива и отсутствием выбросов в атмосферу. Снижается радиус

транспортировки энергии (как правило, за счет отсутствия питающих сетей).

Исходя из условий потребления электроэнергии лабораторией «Возобновляемая энергетика» 47,482 кВт·ч в день, необходимую мощность могут обеспечить:

- 10 солнечных панелей, номинальной мощностью 155 Вт каждая и суммарной площадью 12,88 кв.м.;

- ветрогенератор номинальной мощностью 1 кВт при скорости ветра 12,5 м/с. В целях достижения надежного бесперебойного электроснабжения лаборатории предусмотрен резерв, представляющий собой электрическую сеть, вводимый в действие устройством автоматического включения резерва – АВР.

Стоимость проекта составляет 1 907 950 тенге.

### 3.4 Экспериментальное исследование солнечной панели «SW 155 моно» в г. Павлодар

Статистические данные об основных составляющих солнечного излучения по территории северных регионов Казахстана, дают возможность оценки перспективного использования солнечных энергетических установок (СЭУ), однако эти данные требуют анализа для выявления особенностей данного, конкретного места.

Количество солнечной энергии, падающей на поверхность Земли, изменяется вследствие движения Солнца. Обычно в полдень на Землю попадает больше солнечной радиации, чем рано утром или поздно вечером.

Поток радиации зависит от времени суток, сезона года и погоды. Чтобы усилить поток солнечной радиации надо собирать ее с большой площади с помощью концентраторов и запасать в аккумуляторах. Количество солнечной радиации, принимаемой солнечной панелью, во многом зависит от ориентации ее в пространстве.

С помощью программы «Солнечный калькулятор» можно вычислить эклиптические, экваториальные и горизонтальные координаты Солнца, время восхода и захода, момент верхней кульминации и уравнение времени. На рисунке 21 показаны данные для г. Павлодар на момент времени 13:31, 21.04.2010г.

**Солнечный калькулятор**

Настройки Помощь

Дата: 21 / 4 / 2010

День: 111

Местное время: 13 h 31 m 31 s

Звездное время: 2 h 36 m 19 s

M.J.D.: 55307,31355

Место: Павлодар

Долгота: 76° 56' Вост.

Широта: 52° 18' Сев.

Часовой пояс: 6 h

**Координаты Солнца**

Долгота: 31,0958 °

Пр. восх.: 1 h 55 m 50 s

Склонение: 11° 51' 17"

Высота: 48,739 °

Зенитный угол: 41,261 °

Азимут: 195,116 °

Ист.: 48,753 °

Вид.: 48,753 °

Макс. ист.: 49,55 °

Воздушная масса: 1,33

Расстояние от Земли: 1,0050491432 а. е.

150353211 km

Угловой диаметр: 31' 50"

Верхняя кульминация: 12 h 51 m

Уравнение времени в полдень: 1,2 m

Восход: 5 h 43 m

Заход: 20 h 0 m

Выбор режима:

☐ Автомат

☒ Ручной

Вычислить

Конец

Рисунок 21 - Горизонтальные координаты Солнца в г. Павлодар, время восхода и захода

Энергия солнечного сияния в г. Павлодар составляет 1221,4 кВт·ч на квадратный метр в год.

Приведен расчет эффективности использования солнечной панели «SW 155 mono» в климатических условиях города Павлодара. А также рассмотрены перспективы использования солнечных панелей как альтернатива традиционным источникам электроэнергии.

Параметры SW 155 mono, при оптимальных погодных условиях (температура поверхности фотоэлемента 25°C, солнечная радиация близка к своему максимальному значению в 1000W/m<sup>2</sup>):

Пиковая мощность 155 Вт.;

напряжение холостого хода 43,6 В.;

Оптимальное напряжение 34,8 В.;

Ток короткого замыкания 4,9 А;

Максимальная мощность при токе 3,46 А.

Приблизительно реальную мощность (P) фотоэлектрической панели можно получить по формуле:

$$P \text{ (кВт·ч/день)} = P_p \text{ (кВт)} \cdot I \text{ (кВт·ч/м}^2 \text{ в день)} \cdot P_R \text{ [кВт·ч/день]} \quad (71)$$

где:  $P_p$  - номинальная мощность в кВт, умноженному на площадь в м<sup>2</sup>.

$I$  - экспозиция солнечного излучения на поверхности, в кВт·ч/м<sup>2</sup> в день

$P_R$  - коэффициент производительности системы.

0,8 для систем, соединенных с сетью;

0,5 - 0,7 для гибридных систем;

0,2 - 0,3 для автономных систем, используемых круглый год.

Проведя не сложные вычисления с помощью формулы (1), получается, что в день от солнечной панели «SW 155 mono» можно получить мощность: с марта по октябрь от 2,4 кВт·ч до 7,51 кВт·ч в день. В осенне-зимние месяцы с ноября по февраль отдаваемая мощность низкая в пределах от 0,79 до 1,78 кВт·ч в день (см. таблицу 6).

Таблица 6 – Отдаваемая мощность в течении года

| №<br>п/<br>п | Название<br>месяца | Солнечная<br>радиация,<br>кВт·ч/м <sup>2</sup> | Вырабатываемая<br>мощность,<br>кВт·ч |
|--------------|--------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1            | январь 2008 г.     | 30,0                                           | 1,16                                 |
| 2            | февраль 2008 г.    | 45,9                                           | 1,78                                 |
| 3            | март 2008 г.       | 98,3                                           | 3,81                                 |
| 4            | апрель 2008 г.     | 138,1                                          | 5,35                                 |
| 5            | май 2008 г.        | 185,1                                          | 7,17                                 |
| 6            | июнь 2008 г.       | 193,9                                          | 7,51                                 |
| 7            | июль 2008 г.       | 183,8                                          | 7,12                                 |
| 8            | август 2008 г.     | 150,6                                          | 5,84                                 |
| 9            | сентябрь 2008 г.   | 88,5                                           | 3,43                                 |
| 10           | октябрь 2008 г.    | 62,2                                           | 2,41                                 |
| 11           | ноябрь 2008 г.     | 24,5                                           | 0,95                                 |
| 12           | декабрь 2008 г.    | 20,4                                           | 0,79                                 |

Таким образом, модуль площадью один квадратный метр производит достаточно электричества, чтобы питать нагрузку в 125 Вт в летнее время года и примерно 20 Вт в осенне-зимние месяцы. На рисунке 22 более подробно показана вырабатываемая мощность кВт·ч от солнечной панели «SW 155 mono».

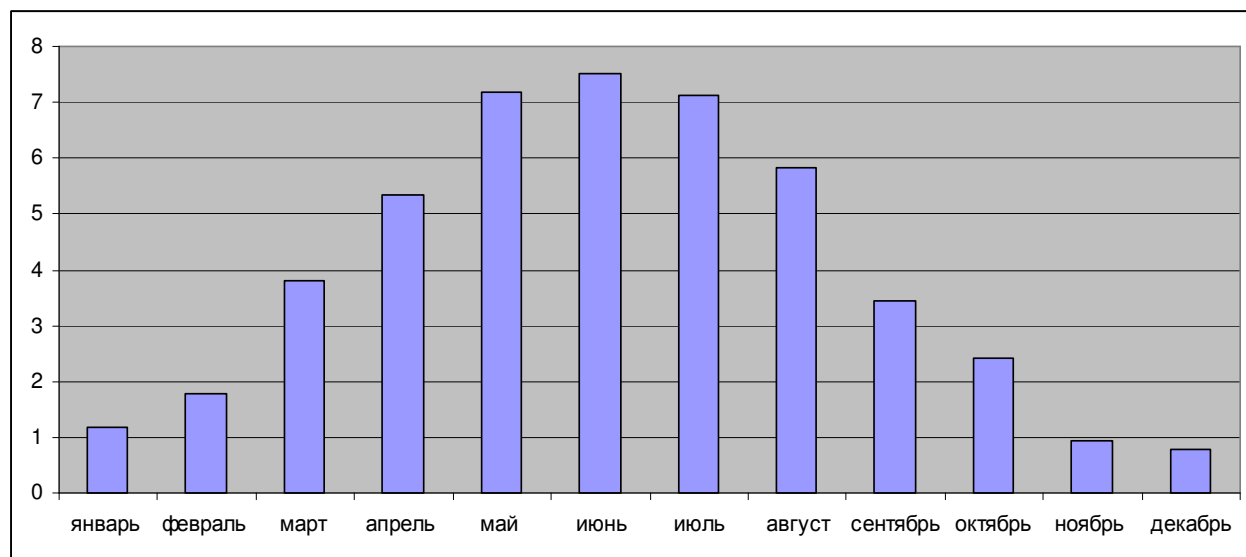


Рисунок 22 – Средняя вырабатываемая мощность кВт·ч в течении месяца.

Из рисунка 22 следует что, выгоднее всего использовать солнечную панель в летнее время года. Для получения нужной мощности необходимо большее количество солнечных панелей. Расширение модуля или добавление аккумуляторов увеличивает стоимость системы, поэтому для определения ее оптимального размера нужно тщательно изучить энергопотребление. Фотоэлектрические системы с аккумулятором можно приспособить для

питания оборудования 220 В. переменного тока. Для этого между аккумулятором и нагрузкой, устанавливается инвертор - который преобразует постоянный ток в переменный.

Самый главный недостаток - это то что фотоэлектрические панели могут работать только в дневное время и при свете Солнца. Для компенсации этого недостатка к системе подсоединяют аккумулятор. Он заряжается от солнечного генератора, запасает энергию и делает ее доступной в любое время. Даже в самых неблагоприятных условиях энергия, сохраняемая в аккумуляторах, может питать необходимое оборудование.

Очень важным фактором экономического анализа является срок эксплуатации фотоэлектрической системы. Сроки службы разных компонентов солнечного энергоснабжения подсчитаны на основе опыта, накопленного за последние годы. Срок службы фотоэлектрических панелей оценивается в 20 лет.

Подводя итог можно сказать, что киловатт-час электричества, выработанного фотоэлектрической системой, все еще дороже традиционной электроэнергии в 7-10 раз. Таким образом, рынок фотоэлементов пока занимает небольшую нишу в мировой экономике. Но он продолжает стабильно расти в тех сегментах рынка, где фотоэлементы конкурентоспособны, например, в автономных, удаленных от электросети системах.

### **3.5 Расчет требующейся площади модулей солнечных панелей для обеспечения энергией двух вариантов локальных потребителей**

Исследуем возможность обеспечения электроэнергией отдельного сельского дома (коттеджа) с годовым потреблением энергии в 1500 кВт·ч., а также фермерского хозяйства с годовым потреблением 7000 кВт·ч. (переменный ток напряжением 220 В и частотой 50 Гц). Для этого необходимо знать значение валового потенциала солнечной энергии  $I_{\text{год}}$  (кВт·ч/м<sup>2</sup>·год) и средней мощности  $P_{\text{ср}}$  (кВт/м<sup>2</sup>). Рассчитать требующуюся площадь солнечных панелей «SW 155 mono» для обеспечения энергией двух вариантов локальных потребителей, соединенных с энергосистемой. Результаты расчетов представить в табличном и графическом виде.

Из рисунка 17 следует что,  $I_{\text{сумм.год}} = 1221,4$  кВт·ч/м<sup>2</sup>·год при значительных колебаниях потока солнечной радиации по месяцам года (от 20,4 кВт·ч/м<sup>2</sup> в декабре до 193,9 кВт·ч/м<sup>2</sup> в июне). Среднюю мощность можно определить по формуле:

$$P_{\text{сумм}} = I_{\text{сумм.год}} / 8760 \text{ (кВт/м}^2\text{)}, \quad (72)$$

Для определения средней мощности необходимо знать среднюю продолжительность солнечного сияния в каждом месяце.

$$P_{cp} = I_{мес}/t_j \cdot (\text{кВт/м}^2),$$

где  $t_j$  – продолжительность  $j$ -того месяца в часах.

Найдем среднюю продолжительность солнечного сияния в каждом месяце с помощью программы «Солнечный калькулятор» время восхода и захода Солнца для каждого дня, после легко вычислить среднюю продолжительность солнечного сияния в каждом месяце. Результаты занесены в таблицу 7, 8 и 9.

Таблица 7 – Средняя продолжительность солнечного сияния январь – апрель

| Месяц     | Кол-во часов, когда светит солнце | Месяц      | Кол-во часов, когда светит солнце | Месяц    | Кол-во часов, когда светит солнце | Месяц     | Кол-во часов, когда светит солнце |
|-----------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| 1 января  | 7,46                              | 1 февраля  | 9,04                              | 1 марта  | 10,51                             | 1 апреля  | 12,58                             |
| 2 января  | 7,47                              | 2 февраля  | 9,07                              | 2 марта  | 10,54                             | 2 апреля  | 13,01                             |
| 3 января  | 7,48                              | 3 февраля  | 9,01                              | 3 марта  | 10,59                             | 3 апреля  | 13,06                             |
| 4 января  | 7,05                              | 4 февраля  | 9,15                              | 4 марта  | 11,03                             | 4 апреля  | 13,01                             |
| 5 января  | 7,51                              | 5 февраля  | 9,18                              | 5 марта  | 11,07                             | 5 апреля  | 13,13                             |
| 6 января  | 7,53                              | 6 февраля  | 9,22                              | 6 марта  | 11,12                             | 6 апреля  | 13,18                             |
| 7 января  | 7,55                              | 7 февраля  | 9,25                              | 7 марта  | 11,16                             | 7 апреля  | 13,22                             |
| 8 января  | 7,57                              | 8 февраля  | 9,29                              | 8 марта  | 11,19                             | 8 апреля  | 13,26                             |
| 9 января  | 7,59                              | 9 февраля  | 9,32                              | 9 марта  | 11,23                             | 9 апреля  | 13,29                             |
| 10 января | 8,00                              | 10 февраля | 9,36                              | 10 марта | 11,28                             | 10 апреля | 13,34                             |
| 11 января | 8,03                              | 11 февраля | 9,04                              | 11 марта | 11,32                             | 11 апреля | 13,38                             |
| 12 января | 8,05                              | 12 февраля | 9,44                              | 12 марта | 11,36                             | 12 апреля | 13,42                             |
| 13 января | 8,08                              | 13 февраля | 9,48                              | 13 марта | 11,04                             | 13 апреля | 13,45                             |
| 14 января | 8,09                              | 14 февраля | 9,52                              | 14 марта | 11,44                             | 14 апреля | 13,05                             |
| 15 января | 8,12                              | 15 февраля | 9,56                              | 15 марта | 11,48                             | 15 апреля | 13,54                             |
| 16 января | 8,15                              | 16 февраля | 10,00                             | 16 марта | 11,53                             | 16 апреля | 13,57                             |
| 17 января | 8,17                              | 17 февраля | 10,03                             | 17 марта | 11,56                             | 17 апреля | 13,59                             |
| 18 января | 8,02                              | 18 февраля | 10,07                             | 18 марта | 12,00                             | 18 апреля | 14,05                             |
| 19 января | 8,23                              | 19 февраля | 10,11                             | 19 марта | 12,05                             | 19 апреля | 14,01                             |
| 20 января | 8,25                              | 20 февраля | 10,15                             | 20 марта | 12,09                             | 20 апреля | 14,13                             |
| 21 января | 8,28                              | 21 февраля | 10,19                             | 21 марта | 12,12                             | 21 апреля | 14,17                             |
| 22 января | 8,32                              | 22 февраля | 10,23                             | 22 марта | 12,17                             | 22 апреля | 14,21                             |
| 23 января | 8,35                              | 23 февраля | 10,27                             | 23 марта | 12,21                             | 23 апреля | 14,24                             |
| 24 января | 8,37                              | 24 февраля | 10,32                             | 24 марта | 12,25                             | 24 апреля | 14,28                             |
| 25 января | 8,04                              | 25 февраля | 10,35                             | 25 марта | 12,29                             | 25 апреля | 14,32                             |
| 26 января | 8,44                              | 26 февраля | 10,39                             | 26 марта | 12,33                             | 26 апреля | 14,36                             |

### Продолжение таблицы 7

|                                        |               |            |               |          |               |           |               |
|----------------------------------------|---------------|------------|---------------|----------|---------------|-----------|---------------|
| 27 января                              | 8,47          | 27 февраля | 10,43         | 27 марта | 12,37         | 27 апреля | 14,39         |
| 28 января                              | 8,51          | 28 февраля | 10,47         | 28 марта | 12,42         | 28 апреля | 14,43         |
| 29 января                              | 8,54          |            |               | 29 марта | 12,45         | 29 апреля | 14,47         |
| 30 января                              | 8,57          |            |               | 30 марта | 12,49         | 30 апреля | 14,05         |
| 31 января                              | 9,00          |            |               | 31 марта | 12,54         |           |               |
| <b>Итого,<br/>среднее<br/>значение</b> | <b>250,28</b> |            | <b>272,39</b> |          | <b>361,59</b> |           | <b>411,27</b> |

Таблица 8 – Средняя продолжительность солнечного сияния май – август

| Месяц  | Кол-во часов, когда светит солнце | Месяц   | Кол-во часов, когда светит солнце | Месяц   | Кол-во часов, когда светит солнце | Месяц      | Кол-во часов, когда светит солнце |
|--------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|
| 1 мая  | 14:54                             | 1 июня  | 16:25                             | 1 июля  | 16:04                             | 1 августа  | 15:03                             |
| 2 мая  | 14:58                             | 2 июня  | 16:27                             | 2 июля  | 16:04                             | 2 августа  | 15:26                             |
| 3 мая  | 15:01                             | 3 июня  | 16:29                             | 3 июля  | 16:38                             | 3 августа  | 15:22                             |
| 4 мая  | 15:05                             | 4 июня  | 16:31                             | 4 июля  | 16:37                             | 4 августа  | 15:02                             |
| 5 мая  | 15:09                             | 5 июня  | 16:32                             | 5 июля  | 16:35                             | 5 августа  | 15:16                             |
| 6 мая  | 15:12                             | 6 июня  | 16:34                             | 6 июля  | 16:34                             | 6 августа  | 15:13                             |
| 7 мая  | 15:15                             | 7 июня  | 16:35                             | 7 июля  | 16:32                             | 7 августа  | 15:09                             |
| 8 мая  | 15:19                             | 8 июня  | 16:37                             | 8 июля  | 16:03                             | 8 августа  | 15:05                             |
| 9 мая  | 15:22                             | 9 июня  | 16:38                             | 9 июля  | 16:29                             | 9 августа  | 15:02                             |
| 10 мая | 15:26                             | 10 июня | 16:39                             | 10 июля | 16:27                             | 10 августа | 14:58                             |
| 11 мая | 15:29                             | 11 июня | 16:04                             | 11 июля | 16:25                             | 11 августа | 14:55                             |
| 12 мая | 15:33                             | 12 июня | 16:41                             | 12 июля | 16:23                             | 12 августа | 14:52                             |
| 13 мая | 15:36                             | 13 июня | 16:42                             | 13 июля | 16:21                             | 13 августа | 14:48                             |
| 14 мая | 15:38                             | 14 июня | 16:43                             | 14 июля | 16:19                             | 14 августа | 14:45                             |
| 15 мая | 15:42                             | 15 июня | 16:44                             | 15 июля | 16:17                             | 15 августа | 14:41                             |
| 16 мая | 15:44                             | 16 июня | 16:44                             | 16 июля | 16:14                             | 16 августа | 14:36                             |
| 17 мая | 15:48                             | 17 июня | 16:44                             | 17 июля | 16:12                             | 17 августа | 14:33                             |
| 18 мая | 15:05                             | 18 июня | 16:45                             | 18 июля | 16:01                             | 18 августа | 14:29                             |
| 19 мая | 15:54                             | 19 июня | 16:45                             | 19 июля | 16:08                             | 19 августа | 14:26                             |
| 20 мая | 15:56                             | 20 июня | 16:45                             | 20 июля | 16:04                             | 20 августа | 14:22                             |
| 21 мая | 15:59                             | 21 июня | 16:46                             | 21 июля | 16:03                             | 21 августа | 14:18                             |
| 22 мая | 16:02                             | 22 июня | 16:46                             | 22 июля | 15:59                             | 22 августа | 14:15                             |
| 23 мая | 16:05                             | 23 июня | 16:45                             | 23 июля | 15:57                             | 23 августа | 14:11                             |
| 24 мая | 16:07                             | 24 июня | 16:45                             | 24 июля | 15:54                             | 24 августа | 14:06                             |
| 25 мая | 16:09                             | 25 июня | 16:45                             | 25 июля | 15:51                             | 25 августа | 14:03                             |
| 26 мая | 16:12                             | 26 июня | 16:44                             | 26 июля | 15:48                             | 26 августа | 13:59                             |
| 27 мая | 16:15                             | 27 июня | 16:44                             | 27 июля | 15:45                             | 27 августа | 13:56                             |
| 28 мая | 16:17                             | 28 июня | 16:43                             | 28 июля | 15:42                             | 28 августа | 13:52                             |
| 29 мая | 16:19                             | 29 июня | 16:42                             | 29 июля | 15:39                             | 29 августа | 13:47                             |

Продолжение таблицы 8

|                                        |               |         |               |         |               |            |               |
|----------------------------------------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|------------|---------------|
| 30 мая                                 | 16:22         | 30 июня | 16:41         | 30 июля | 15:36         | 30 августа | 13:43         |
| 31 мая                                 | 16:23         |         |               | 31 июля | 15:32         | 31 августа | 13:04         |
| <b>Итого,<br/>среднее<br/>значение</b> | <b>481,41</b> |         | <b>492,01</b> |         | <b>495,61</b> |            | <b>446,38</b> |

Таблица 9 – Средняя продолжительность солнечного сияния сентябрь – декабрь

| Месяц       | Кол-во часов, когда светит солнце | Месяц      | Кол-во часов, когда светит солнце | Месяц     | Кол-во часов, когда светит солнце | Месяц      | Кол-во часов, когда светит солнце |
|-------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|
| 1 сентября  | 13:36                             | 1 октября  | 11:35                             | 1 ноября  | 9:34                              | 1 декабря  | 8:02                              |
| 2 сентября  | 13:31                             | 2 октября  | 11:32                             | 2 ноября  | 9:31                              | 2 декабря  | 7:59                              |
| 3 сентября  | 13:28                             | 3 октября  | 11:28                             | 3 ноября  | 9:27                              | 3 декабря  | 7:58                              |
| 4 сентября  | 13:24                             | 4 октября  | 11:23                             | 4 ноября  | 9:23                              | 4 декабря  | 7:56                              |
| 5 сентября  | 13:19                             | 5 октября  | 11:19                             | 5 ноября  | 9:19                              | 5 декабря  | 7:54                              |
| 6 сентября  | 13:16                             | 6 октября  | 11:16                             | 6 ноября  | 9:15                              | 6 декабря  | 7:52                              |
| 7 сентября  | 13:12                             | 7 октября  | 11:11                             | 7 ноября  | 9:12                              | 7 декабря  | 7:51                              |
| 8 сентября  | 13:07                             | 8 октября  | 11:07                             | 8 ноября  | 9:09                              | 8 декабря  | 7:05                              |
| 9 сентября  | 13:04                             | 9 октября  | 11:04                             | 9 ноября  | 9:05                              | 9 декабря  | 7:48                              |
| 10 сентября | 13:00                             | 10 октября | 11:00                             | 10 ноября | 9:02                              | 10 декабря | 7:46                              |
| 11 сентября | 12:56                             | 11 октября | 10:55                             | 11 ноября | 8:58                              | 11 декабря | 7:45                              |
| 12 сентября | 12:52                             | 12 октября | 10:51                             | 12 ноября | 8:55                              | 12 декабря | 7:44                              |
| 13 сентября | 12:48                             | 13 октября | 10:48                             | 13 ноября | 8:52                              | 13 декабря | 7:43                              |
| 14 сентября | 12:44                             | 14 октября | 10:44                             | 14 ноября | 8:49                              | 14 декабря | 7:42                              |
| 15 сентября | 12:04                             | 15 октября | 10:39                             | 15 ноября | 8:45                              | 15 декабря | 7:42                              |
| 16 сентября | 12:36                             | 16 октября | 10:35                             | 16 ноября | 8:42                              | 16 декабря | 7:41                              |
| 17 сентября | 12:32                             | 17 октября | 10:31                             | 17 ноября | 8:39                              | 17 декабря | 7:04                              |
| 18 сентября | 12:28                             | 18 октября | 10:28                             | 18 ноября | 8:36                              | 18 декабря | 7:04                              |
| 19 сентября | 12:24                             | 19 октября | 10:24                             | 19 ноября | 8:33                              | 19 декабря | 7:04                              |
| 20 сентября | 12:02                             | 20 октября | 10:02                             | 20 ноября | 8:03                              | 20 декабря | 7:39                              |
| 21 сентября | 12:16                             | 21 октября | 10:15                             | 21 ноября | 8:27                              | 21 декабря | 7:39                              |
| 22 сентября | 12:11                             | 22 октября | 10:12                             | 22 ноября | 8:24                              | 22 декабря | 7:39                              |
| 23 сентября | 12:08                             | 23 октября | 10:08                             | 23 ноября | 8:21                              | 23 декабря | 7:39                              |
| 24 сентября | 12:04                             | 24 октября | 10:04                             | 24 ноября | 8:19                              | 24 декабря | 7:04                              |
| 25 сентября | 11:59                             | 25 октября | 10:00                             | 25 ноября | 8:16                              | 25 декабря | 7:04                              |
| 26 сентября | 11:56                             | 26 октября | 9:56                              | 26 ноября | 8:13                              | 26 декабря | 7:04                              |
| 27 сентября | 11:52                             | 27 октября | 9:53                              | 27 ноября | 8:01                              | 27 декабря | 7:41                              |

Продолжение таблицы 9

|                                        |               |            |               |           |               |            |               |
|----------------------------------------|---------------|------------|---------------|-----------|---------------|------------|---------------|
| 28 сентября                            | 11:47         | 28 октября | 9:49          | 28 ноября | 8:08          | 28 декабря | 7:42          |
| 29 сентября                            | 11:44         | 29 октября | 9:45          | 29 ноября | 8:07          | 29 декабря | 7:43          |
| 30 сентября                            | 11:04         | 30 октября | 9:41          | 30 ноября | 8:04          | 30 декабря | 7:44          |
|                                        |               | 31 октября | 9:37          |           |               | 31 декабря | 7:45          |
| <b>Итого,<br/>среднее<br/>значение</b> | <b>372,94</b> |            | <b>322,70</b> |           | <b>257,65</b> |            | <b>231,44</b> |

Таблица 10 – Продолжительность фактического солнечного сияния в месяц (часов) для г. Павлодар

| Янв.   | Февр.  | Март   | Апр.   | Май    | Июнь   | Июль   | Авг.               | Сент.  | Окт.   | Нояб.  | Дек.   | Год     |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 250,28 | 272,39 | 361,59 | 411,27 | 481,41 | 492,01 | 495,61 | 446,3 <sub>8</sub> | 372,94 | 322,70 | 257,65 | 231,44 | 4395,67 |

Соответственно средняя валовая мощность солнечной радиации:  
 $P_{\text{ср}} = 249,678 \text{ Вт/м}^2$  при месячных колебаниях от  $88,144 \text{ Вт/м}^2$  в декабре до  $394,098 \text{ Вт/м}^2$  в июне (таблица 11).

Таблица 11 – Средняя валовая мощность солнечной радиации  $P_{\text{ср}}$

| № п/п | Название месяца | Валовый потенциал солнечной энергии $I_{\text{мес}}$ , (кВт·ч/м <sup>2</sup> ) | Средняя мощность, $P_{\text{ср}}$ . (Вт/м <sup>2</sup> ) |
|-------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1     | январь          | 30                                                                             | 119,866                                                  |
| 2     | февраль         | 45,9                                                                           | 168,508                                                  |
| 3     | март            | 98,3                                                                           | 271,855                                                  |
| 4     | апрель          | 138,1                                                                          | 335,789                                                  |
| 5     | май             | 185,1                                                                          | 384,496                                                  |
| 6     | июнь            | 193,9                                                                          | 394,098                                                  |
| 7     | июль            | 183,8                                                                          | 370,856                                                  |
| 8     | август          | 150,6                                                                          | 337,381                                                  |
| 9     | сентябрь        | 88,5                                                                           | 237,304                                                  |
| 10    | октябрь         | 62,2                                                                           | 192,749                                                  |
| 11    | ноябрь          | 24,5                                                                           | 95,090                                                   |
| 12    | декабрь         | 20,4                                                                           | 88,144                                                   |

Определение технического потенциала солнечной энергии в г. Павлодаре производится на основании полученных в табл. 11 данных по  $I_{\text{мес}}$ , (кВт·ч/м<sup>2</sup>), 1...12, а также основных технических показателей солнечной панели по формуле:

$$I_{\text{техн}} = \kappa_{\text{пр}} \cdot \sum_{j=1}^{12} I_{\text{техн.}j}, \quad (74)$$

где  $\kappa_{\text{пр}}$  (о.е.) = 1,3 – коэффициент пересчета данных по солнечной радиации с горизонтальной площадки на наклонную;  $I_{\text{техн.}j}$  – месячные значения технического потенциала солнечной энергии приходящегося на горизонтальную площадку, рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{техн.}j} = I_{\text{мес}} \cdot F \cdot \tau \cdot \eta_{\text{сэ}} \cdot \eta_N, \quad (75)$$

где  $I_{\text{мес}}$ ,  $j = 1 \dots 12$ , данные табл. 9;  
 $F$  – площадь элементов СФЭУ;  
 $\tau$  – коэффициент светопропускания защитного покрытия модулей, равен 0,85;  
 $\eta_{\text{сэ}}$  – КПД солнечных элементов 18% ;  
 $\eta_N$  – суммарный КПД преобразования и передачи энергии СФЭУ к потребителю, определяемый по формуле:

$$\eta_N = K_{\text{зан}} \cdot \eta_U \cdot \eta_{\text{э}}, \quad (76)$$

$K_{\text{зан}}$  – коэффициент заполнения поверхности модулей СФЭУ, равен 0,9  
 $\eta_U$  – коэффициент потерь энергии на последовательную коммутацию элементов в СФЭУ, равен 0,95;  
 $\eta_{\text{э}}$  – коэффициент потерь энергии в инверторе и на передачи энергии потребителю равен 0,97.

С учетом принятых исходных данных получаем, что

$$I_{\text{техн.}j} = 0,155 \cdot I_{\text{мес}}, \quad (77)$$

В табл. 10 сведены данные по расчету:  $I_{\text{техн.}j}$ ,  $I_{\text{техн}}$ ,  $P_{\text{техн}}$ .

$$P_{\text{техн.}j} = I_{\text{сумм.}j} / t_j, \quad (78)$$

где  $t_j$  – продолжительность  $j$ -того месяца в часах.

Таблица 12 – Расчет технического потенциала солнечной энергетики

| Параметры                                  | Месяц |       |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |
|--------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
|                                            | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9    | 10    | 11    | 12    |
| $I_{\text{техн.},j}$ , кВтч/м <sup>2</sup> | 4,65  | 7,11  | 15,24 | 21,41 | 28,69 | 30,05 | 28,49 | 23,34 | 13,7 | 9,64  | 3,80  | 3,16  |
| $I_{\text{сумм.},j}$ , кВтч/м <sup>2</sup> | 6,05  | 9,25  | 19,81 | 27,83 | 37,30 | 39,07 | 37,04 | 30,35 | 17,8 | 12,53 | 4,94  | 4,11  |
| $P_{\text{техн.},j}$ , Вт/м <sup>2</sup>   | 24,15 | 33,95 | 54,78 | 67,66 | 77,48 | 79,41 | 74,73 | 67,98 | 47,8 | 38,84 | 19,16 | 17,76 |

$P_{\text{сумм}}$  и  $I_{\text{сумм}}$  рассчитаны на основании табл. 12.

В данном случае имеем  $I_{\text{сумм}} = 246,09$  кВт·ч/м<sup>2</sup>·год и  $P_{\text{сумм}} = 28,092$  Вт/м<sup>2</sup>.

Требуемое количество солнечных панелей для обеспечения двух видов потребителей  $\mathcal{E}_{\text{потр}}$  в 1500 кВт·ч/год и 7000 кВт·ч/год определится по формуле:

$$F_{\text{треб.}} = \mathcal{E}_{\text{потр}} / I_{\text{сумм}}, \quad (79)$$

Т.е. получаем соответственно 6,095 м<sup>2</sup> и 28,45 м<sup>2</sup> при  $I_{\text{сумм}} = 246,09$  кВт·ч/м<sup>2</sup>·год. Габаритные размеры «SW 155 mono» ВхШ - 1610х810 мм., полезная площадь для получения электроэнергии 1 м<sup>2</sup>. Следовательно, для питания нагрузки будет необходимо панелей 6 шт. в первом случае и 29 шт. во втором.

Прогнозируемая годовая выработка электроэнергии ФЭС установленной мощностью 930 Вт/м<sup>2</sup> и 4495 Вт/м<sup>2</sup> составит в районе г. Павлодар 301,86 Вт/м<sup>2</sup> (см. рис. 23) и 1459 Вт/м<sup>2</sup> (см. рис. 24).

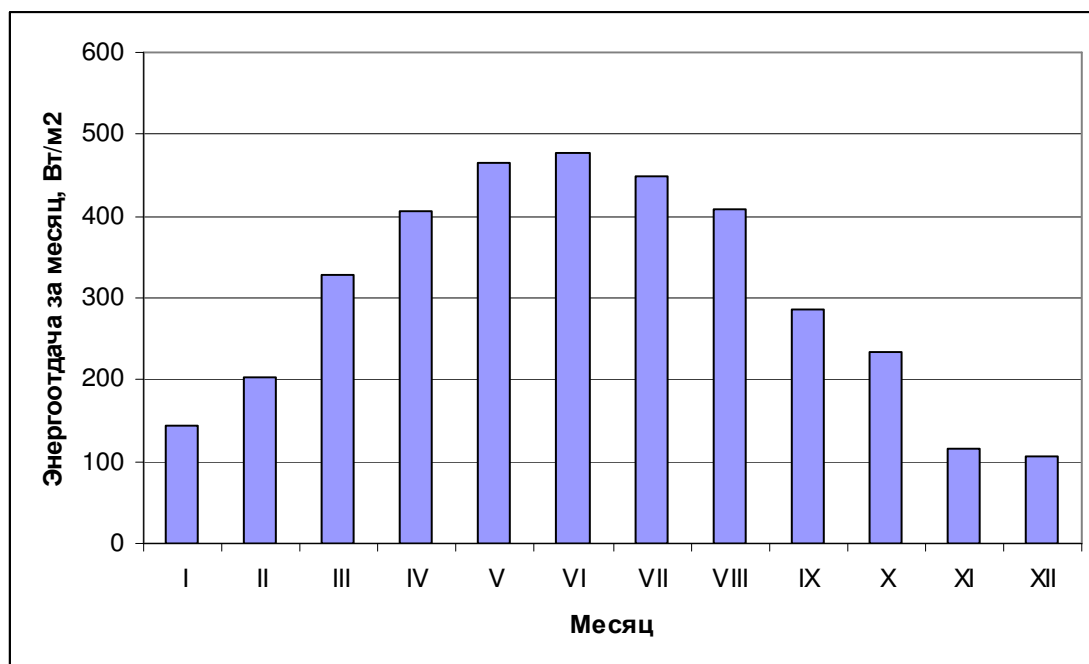


Рисунок 23 – Прогнозируемая годовая выработка электроэнергии ФЭС установленной мощностью 930 Вт/м<sup>2</sup>

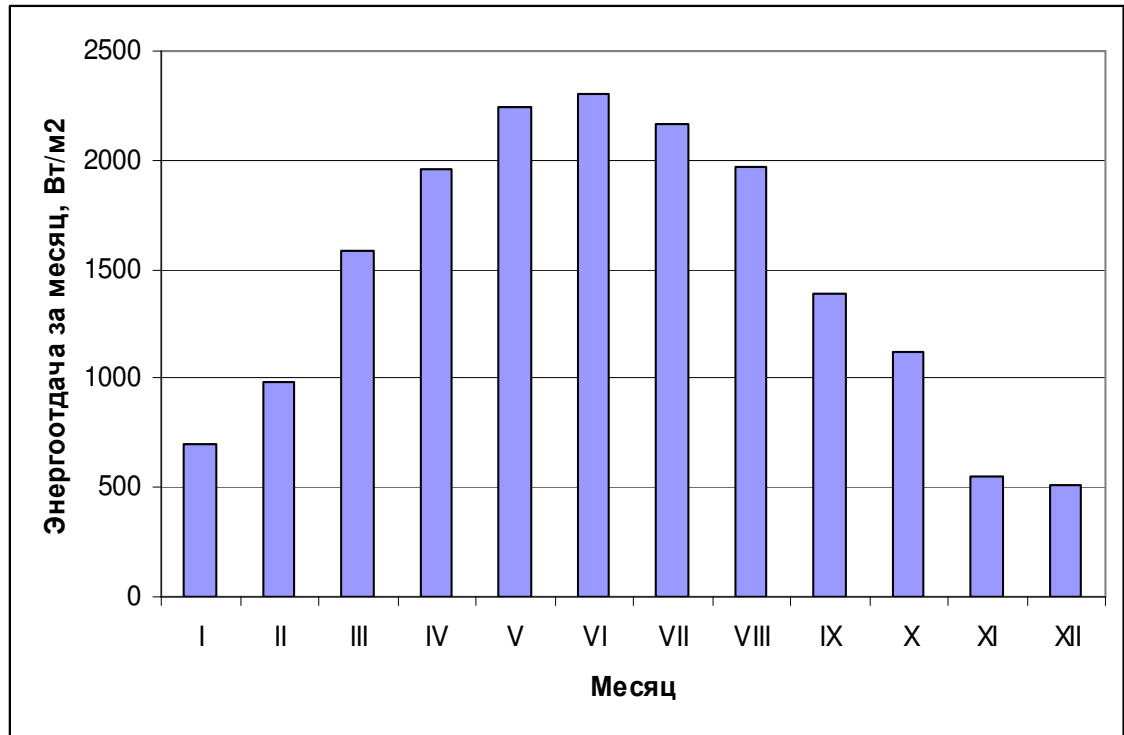


Рисунок 24 – Прогнозируемая годовая выработка электроэнергии ФЭС установленной мощностью 4495 Вт/м<sup>2</sup>

Из диаграммы видно, что показатель для зимних месяцев хуже показателей летних месяцев.

Просуммировав прогнозируемую энергоотдачу системы за 10 лет, можно определить примерную себестоимость 1 кВт·ч вырабатываемой электроэнергии, если учесть капитальные затраты в 5 евро/1 Вт установленной мощности СБ без НДС:

$$C_1 = 930 \cdot K / (10 \cdot 301,86) = 4650 / 3018,6 = 1,54 \text{ Евро/кВт} \cdot \text{ч} = 300 \text{ тг./кВт} \cdot \text{ч};$$

$$C_2 = 4495 \cdot K / (10 \cdot 1459) = 22475 / 14590 = 1,54 \text{ Евро/кВт} \cdot \text{ч} = 300 \text{ тг./кВт} \cdot \text{ч};$$

Что гораздо больше стоимости 1 кВт·ч в сети централизованного энергоснабжения, но сравнимо со стоимостью 1 кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой дизель-генераторной установкой (ДГУ).

Динамика удельных показателей цены 1 Вт установленной мощности солнечной панели и ее эффективности (см. рис. 25).

Точки за 2013-й год отражают прогноз показателей при сохранении существующей динамики.

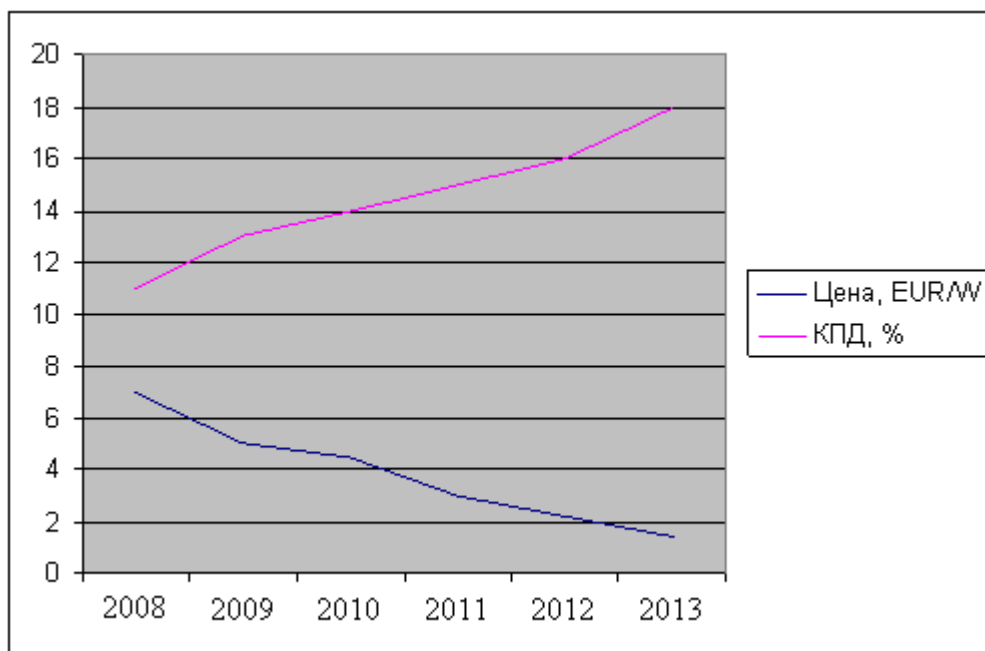


Рисунок 25 – Показатель цены 1 Вт установленной мощности солнечной панели и ее эффективности

### 3.6 Моделирование режимов работы солнечной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33»

Существующие и проектируемые системы можно эффективно исследовать с помощью математических моделей (аналитических и имитационных), реализуемых на современных ЭВМ, которые в этом случае выступают в качестве инструмента экспериментатора с моделью системы.

Параметры SW 155 mono, при оптимальных погодных условиях (температура поверхности фотоэлемента 25°C, солнечная радиация близка к своему максимальному значению в 1000W/m<sup>2</sup>):

пиковая мощность 155 Вт.;

напряжение холостого хода 43,6 В.;

максимальная мощность при напряжении 34,8 В.;

ток короткого замыкания 4,9 А.;

максимальная мощность при токе 3,46 А.

С помощью программы «PVSYST 4.33» была построена ВАХ солнечной панели «SW 155 mono», производства фирмы «Solar World» (см. рис. 26). Программа автоматически считает номинальную мощность, актуальную мощность, потери мощности и результирующую ВАХ.

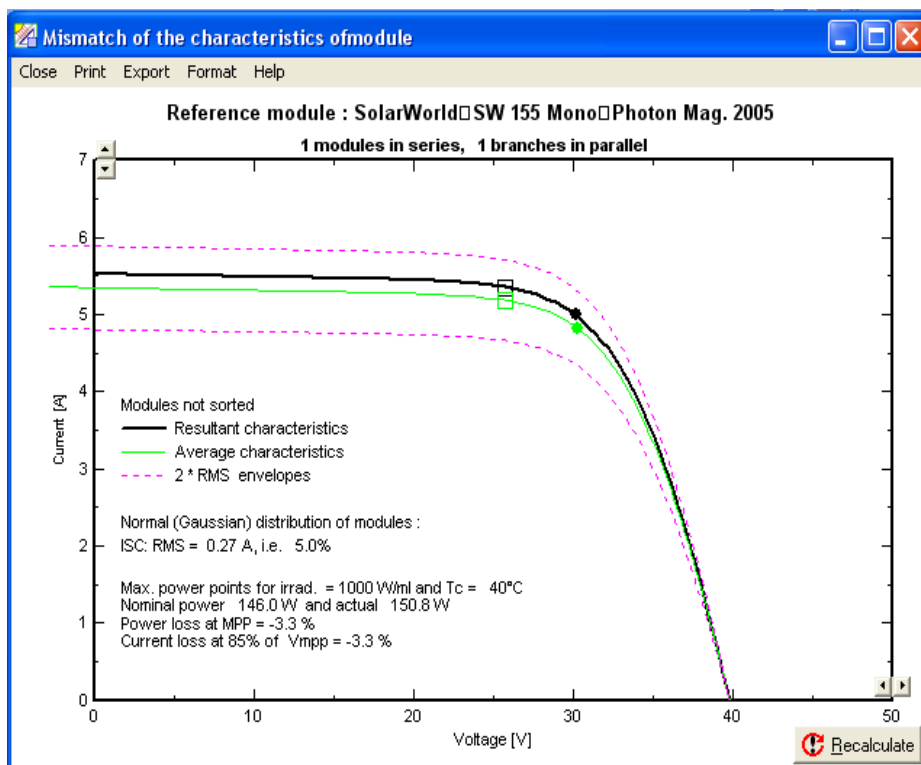


Рисунок 26 – ВАХ солнечной панели «SW 155 mono» при  $1000 \text{ Вт/м}^2$

Также можно построить ВАХ с указанием максимально возможной выработкой электроэнергии в разное время светового дня. (см. рис. 27, 28 и 29).

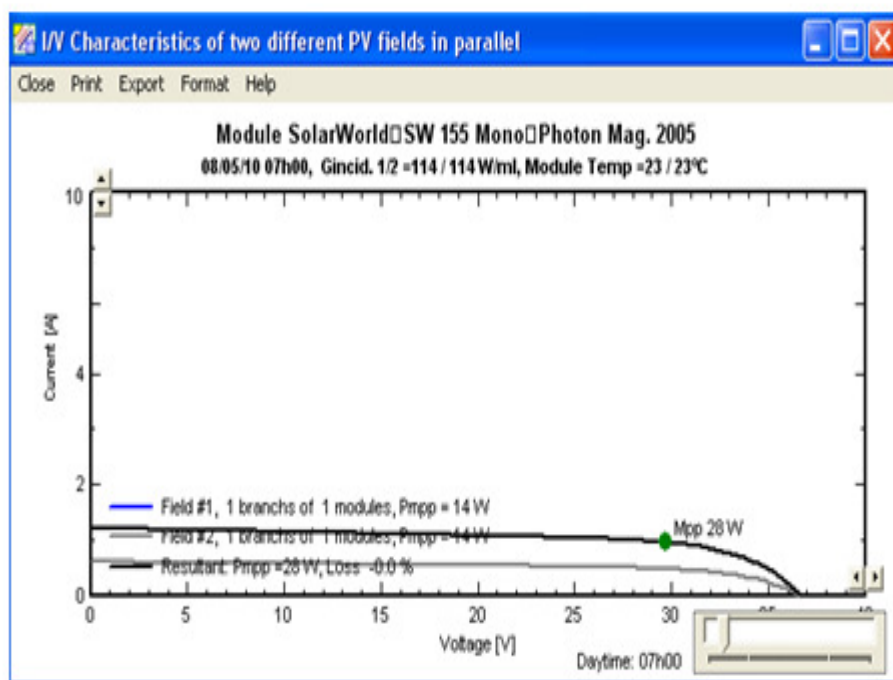


Рисунок 27 – Мощность солнечной панели «SW 155 mono» в 07:00 ч.

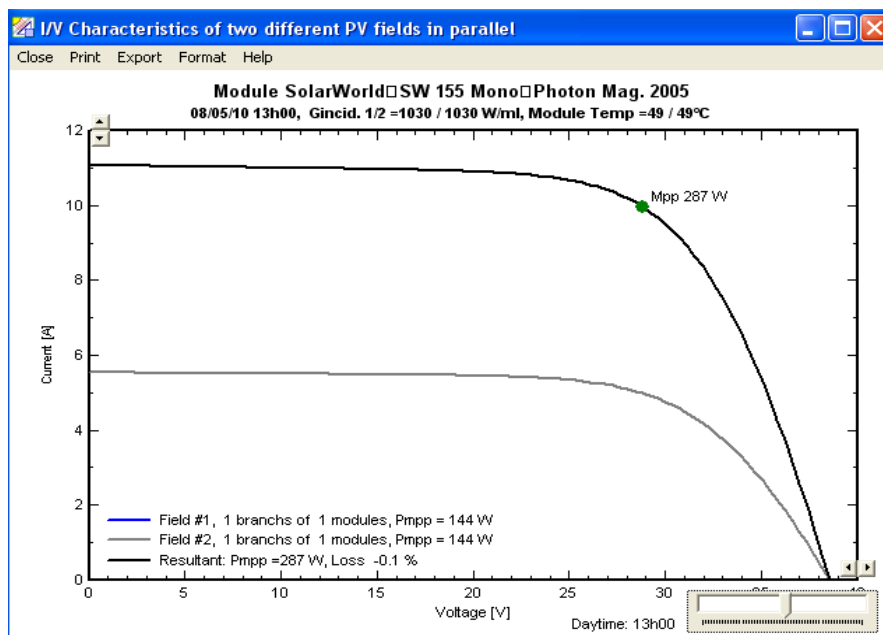


Рисунок 28 – Мощность солнечной панели «SW 155 mono» в 13:00 ч.

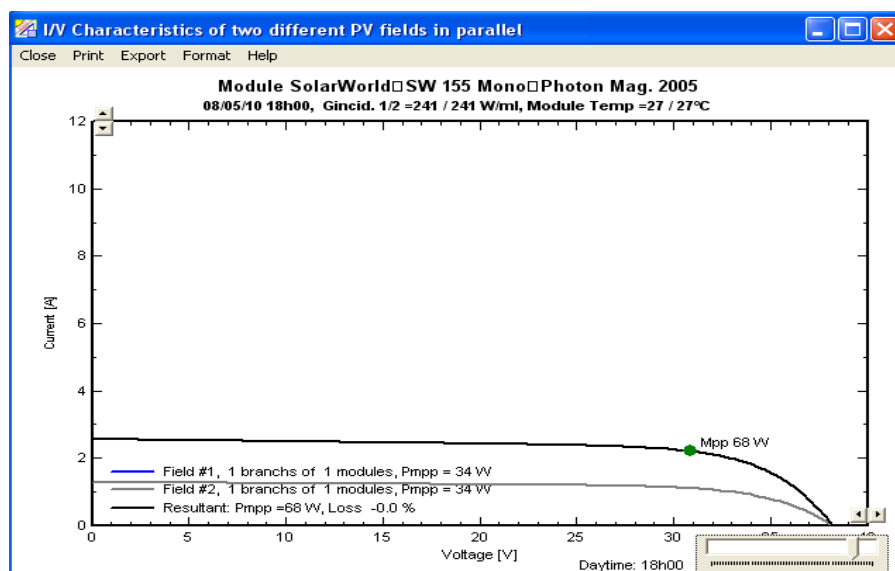


Рисунок 29 – Мощность солнечной панели «SW 155 mono» в 18:00 ч.

В программе «PVSYST 4.33» исследуем приход солнечной радиации к различно ориентированной относительно солнца солнечной панели «SW 155 mono». При горизонтальном угле наклона  $0^{\circ}$ , под углом  $45^{\circ}$  и при вертикальном угле  $90^{\circ}$ .

Определим дневное количество солнечной радиации, поступающее на солнечную панель при угле наклона  $0^{\circ}$ . На рисунке 30 показана зависимость солнечной радиации от угла наклона к горизонту.

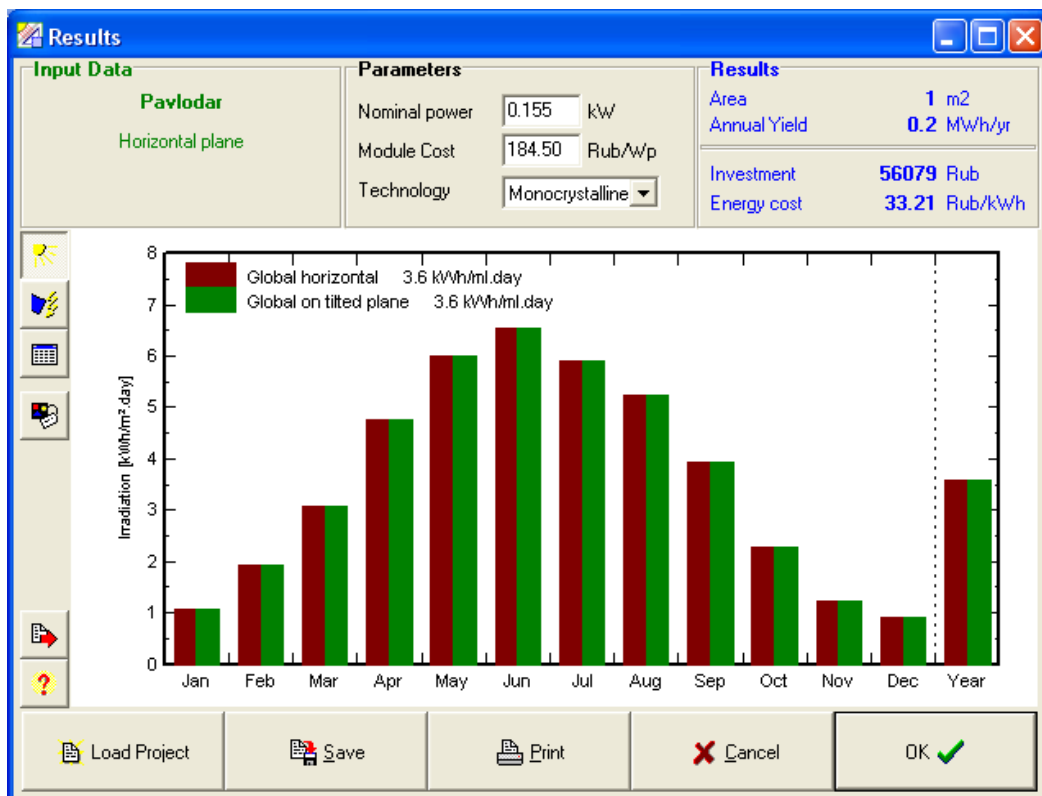


Рисунок 30 – Зависимость солнечной радиации от угла наклона к горизонту  $0^0$

Одновременно считается выходная мощность, в нашем случае 163 кВт·ч в год (см. рис. 31). Также высчитываются глобальная солнечная радиация, радиация падающая на приемную поверхность под углом, выходная мощность солнечной панели в день и месяц. Все полученные значения автоматически заполняются в таблицу (см. рис.32)

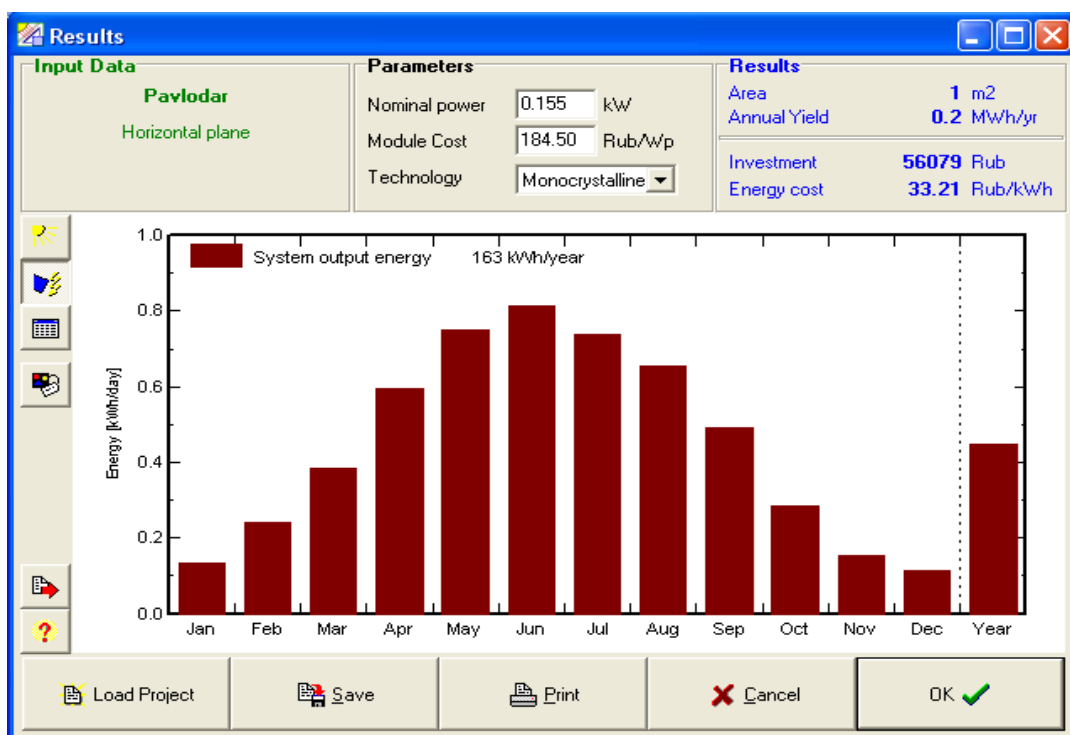


Рисунок 31 – График выработки мощности, при угле наклона  $0^0$

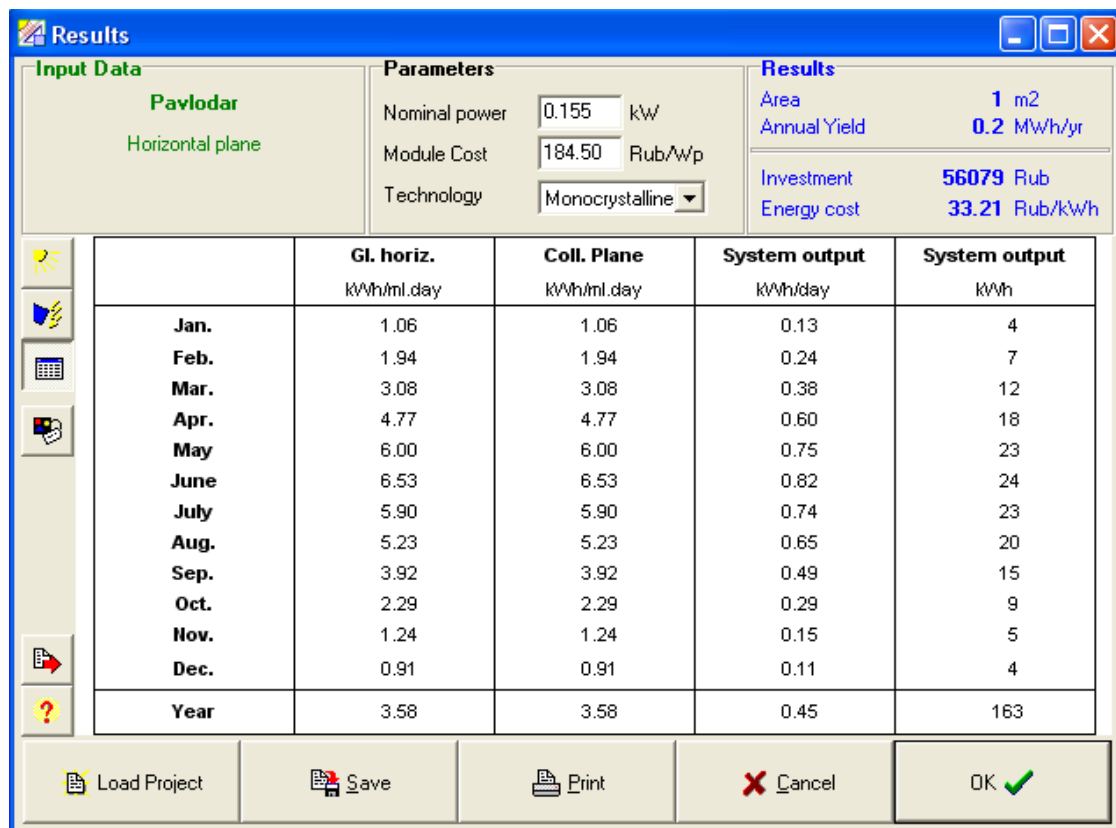


Рисунок 32 – Таблица с полученными данными при угле наклона  $0^{\circ}$

Аналогично определим дневное количество солнечной радиации, поступающее на солнечную панель при угле наклона  $45^{\circ}$ .

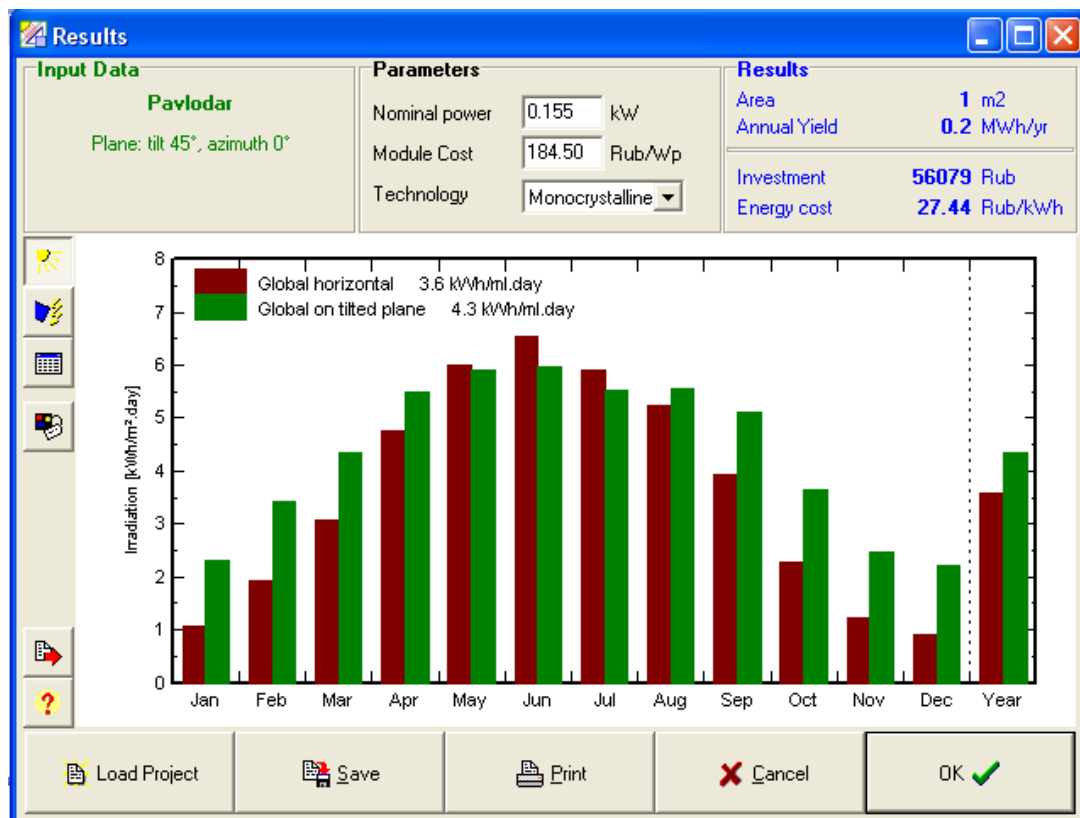


Рисунок 33 – Зависимость солнечной радиации от угла наклона к горизонту  $45^{\circ}$

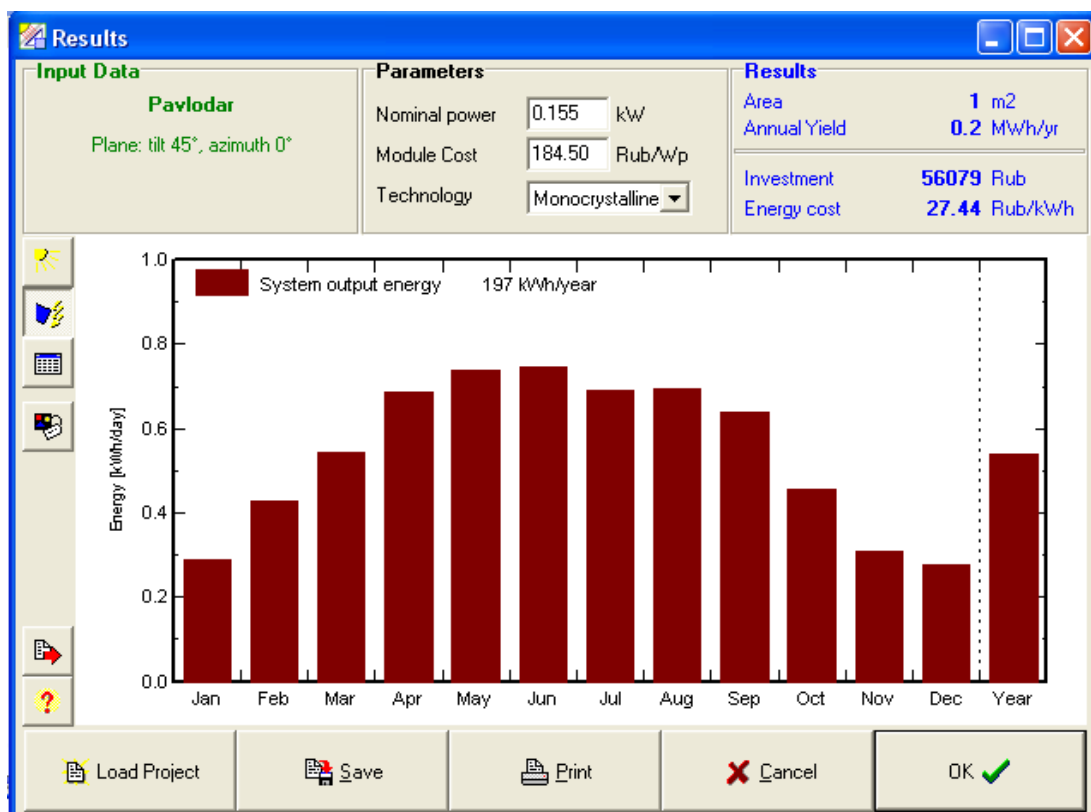


Рисунок 34 – График выработки мощности, при угле наклона 45°

**Results**

**Input Data**  
**Pavlodar**  
 Plane: tilt 45°, azimuth 0°

**Parameters**  
 Nominal power: 0.155 kW  
 Module Cost: 184.50 Rub/Wp  
 Technology: Monocrystalline

**Results**  
 Area: 1 m<sup>2</sup>  
 Annual Yield: 0.2 MWh/yr  
 Investment: 56079 Rub  
 Energy cost: 27.44 Rub/kWh

|      | Gl. horiz.<br>kWh/m <sup>2</sup> .day | Coll. Plane<br>kWh/m <sup>2</sup> .day | System output<br>kWh/day | System output<br>kWh |
|------|---------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Jan. | 1.06                                  | 2.31                                   | 0.29                     | 9                    |
| Feb. | 1.94                                  | 3.41                                   | 0.43                     | 12                   |
| Mar. | 3.08                                  | 4.34                                   | 0.54                     | 17                   |
| Apr. | 4.77                                  | 5.49                                   | 0.69                     | 21                   |
| May  | 6.00                                  | 5.90                                   | 0.74                     | 23                   |
| June | 6.53                                  | 5.97                                   | 0.74                     | 22                   |
| July | 5.90                                  | 5.52                                   | 0.69                     | 21                   |
| Aug. | 5.23                                  | 5.56                                   | 0.69                     | 22                   |
| Sep. | 3.92                                  | 5.11                                   | 0.64                     | 19                   |
| Oct. | 2.29                                  | 3.65                                   | 0.46                     | 14                   |
| Nov. | 1.24                                  | 2.47                                   | 0.31                     | 9                    |
| Dec. | 0.91                                  | 2.22                                   | 0.28                     | 9                    |
| Year | 3.58                                  | 4.33                                   | 0.54                     | 197                  |

Buttons: Load Project, Save, Print, Cancel, OK

Рисунок 35 – Таблица с полученными данными, при угле наклона 45°

Рассчитаем дневное количество солнечной радиации, поступающее на солнечную панель при угле наклона 90°.

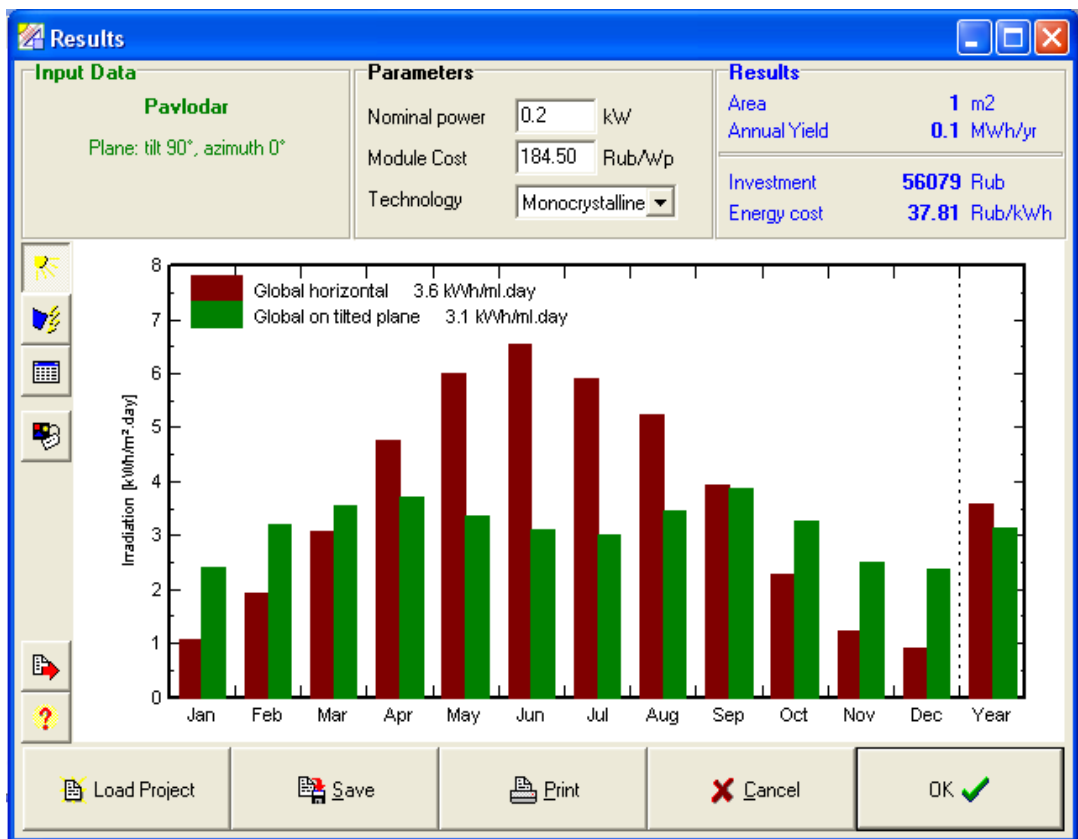


Рисунок 36 – Зависимость солнечной радиации от угла наклона к горизонту 90°

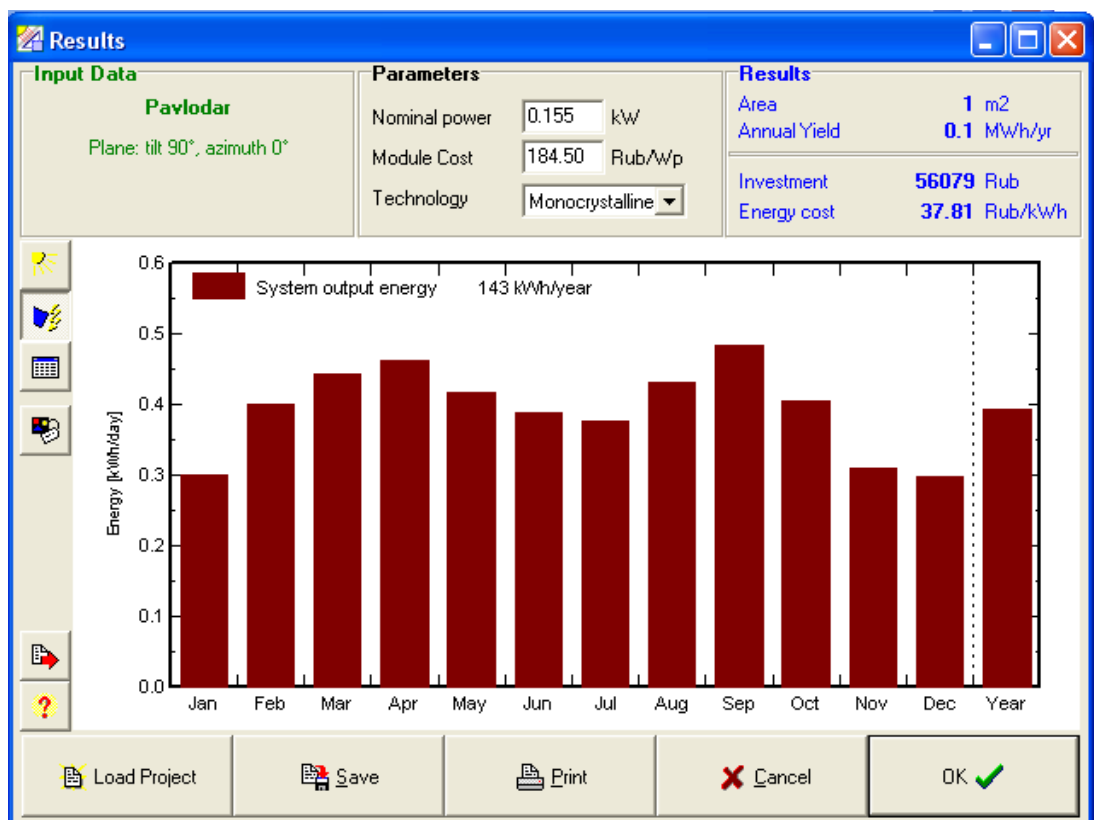


Рисунок 37 – График выработки мощности, при угле наклона 90°

**Results**

**Input Data**  
**Pavlodar**  
 Plane: tilt 90°, azimuth 0°

**Parameters**  
 Nominal power: 0.155 kW  
 Module Cost: 184.50 Rub/Wp  
 Technology: Monocrystalline

**Results**  
 Area: 1 m2  
 Annual Yield: 0.1 MWh/yr  
 Investment: 56079 Rub  
 Energy cost: 37.81 Rub/kWh

|             | Gl. horiz.<br>kWh/m2.day | Coll. Plane<br>kWh/m2.day | System output<br>kWh/day | System output<br>kWh |
|-------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|
| Jan.        | 1.06                     | 2.40                      | 0.30                     | 9                    |
| Feb.        | 1.94                     | 3.21                      | 0.40                     | 11                   |
| Mar.        | 3.08                     | 3.54                      | 0.44                     | 14                   |
| Apr.        | 4.77                     | 3.69                      | 0.46                     | 14                   |
| May         | 6.00                     | 3.34                      | 0.42                     | 13                   |
| June        | 6.53                     | 3.12                      | 0.39                     | 12                   |
| July        | 5.90                     | 3.01                      | 0.38                     | 12                   |
| Aug.        | 5.23                     | 3.45                      | 0.43                     | 13                   |
| Sep.        | 3.92                     | 3.86                      | 0.48                     | 14                   |
| Oct.        | 2.29                     | 3.25                      | 0.41                     | 13                   |
| Nov.        | 1.24                     | 2.49                      | 0.31                     | 9                    |
| Dec.        | 0.91                     | 2.39                      | 0.30                     | 9                    |
| <b>Year</b> | <b>3.58</b>              | <b>3.14</b>               | <b>0.39</b>              | <b>143</b>           |

Buttons: Load Project, Save, Print, Cancel, OK

Рисунок 38 – Таблица с полученными данными, при угле наклона 90°

Программа «PVSYST 4.33» автоматически считает экономические показатели: стоимость модулей, монтажа; стоимость 1 кВт·ч и т.д. Экономические показатели сравниваемых вариантов, при углах 0°, 45° и 90°.

**Results**

**Input Data**  
**Pavlodar**  
 Horizontal plane

**Parameters**  
 Nominal power: 0.155 kW  
 Module Cost: 184.50 Rub/Wp  
 Technology: Monocrystalline

**Results**  
 Area: 1 m2  
 Annual Yield: 0.2 MWh/yr  
 Investment: 56079 Rub  
 Energy cost: 33.21 Rub/kWh

**Economic gross evaluation (excluding taxes and subsidies)**

|                          |                      |
|--------------------------|----------------------|
| Module cost              | 28598 Rub            |
| Supports cost            | 5720 Rub             |
| Inverter and wiring      | 4576 Rub             |
| Transport/Mounting       | 17186 Rub            |
| <b>Total investment</b>  | <b>56079 Rub</b>     |
| Annuities                | 4500 Rub/yr          |
| Maintenance costs        | 917 Rub/yr           |
| <b>Total Yearly cost</b> | <b>5416 Rub/yr</b>   |
| <b>Energy cost</b>       | <b>33.21 Rub/kWh</b> |

These values should only be considered as an order of magnitude. More precise evaluations will be available with detailed simulation.

**Currency**  
 Russia Rub

**Loan**  
 Duration: 20 years  
 Rate: 5.0 %  
 Ann. factor: 0.080

Buttons: Load Project, Save, Print, Cancel, OK

Рисунок 39 – Экономические показатели для первого варианта, при 0°

**Results**

**Input Data**  
**Pavlodar**  
Plane: tilt 45°, azimuth 0°

**Parameters**  
Nominal power: 0.155 kW  
Module Cost: 184.50 Rub/Wp  
Technology: Monocrystalline

**Results**  
Area: 1 m<sup>2</sup>  
Annual Yield: 0.2 MWh/yr  
Investment: 56079 Rub  
Energy cost: 27.44 Rub/kWh

**Economic gross evaluation (excluding taxes and subsidies)**

|                          |                      |
|--------------------------|----------------------|
| Module cost              | 28598 Rub            |
| Supports cost            | 5720 Rub             |
| Inverter and wiring      | 4576 Rub             |
| Transport/Mounting       | 17186 Rub            |
| <b>Total investment</b>  | <b>56079 Rub</b>     |
| Annuities                | 4500 Rub/yr          |
| Maintenance costs        | 917 Rub/yr           |
| <b>Total Yearly cost</b> | <b>5416 Rub/yr</b>   |
| <b>Energy cost</b>       | <b>27.44 Rub/kWh</b> |

These values should only be considered as an order of magnitude. More precise evaluations will be available with detailed simulation.

**Currency**  
Russia Rub

**Loan**  
Duration: 20 years  
Rate: 5.0 %  
Ann. factor: 0.080

Buttons: Load Project, Save, Print, Cancel, OK

Рисунок 40 – Экономические показатели для первого варианта, при 45°

**Results**

**Input Data**  
**Pavlodar**  
Plane: tilt 90°, azimuth 0°

**Parameters**  
Nominal power: 0.155 kW  
Module Cost: 184.50 Rub/Wp  
Technology: Monocrystalline

**Results**  
Area: 1 m<sup>2</sup>  
Annual Yield: 0.1 MWh/yr  
Investment: 56079 Rub  
Energy cost: 37.81 Rub/kWh

**Economic gross evaluation (excluding taxes and subsidies)**

|                          |                      |
|--------------------------|----------------------|
| Module cost              | 28598 Rub            |
| Supports cost            | 5720 Rub             |
| Inverter and wiring      | 4576 Rub             |
| Transport/Mounting       | 17186 Rub            |
| <b>Total investment</b>  | <b>56079 Rub</b>     |
| Annuities                | 4500 Rub/yr          |
| Maintenance costs        | 917 Rub/yr           |
| <b>Total Yearly cost</b> | <b>5416 Rub/yr</b>   |
| <b>Energy cost</b>       | <b>37.81 Rub/kWh</b> |

These values should only be considered as an order of magnitude. More precise evaluations will be available with detailed simulation.

**Currency**  
Russia Rub

**Loan**  
Duration: 20 years  
Rate: 5.0 %  
Ann. factor: 0.080

Buttons: Load Project, Save, Print, Cancel, OK

Рисунок 41 – Экономические показатели для первого варианта, при 90°

Вывод: при фиксированном угле наклона в 45° к горизонту среднегодовая выходная мощность – 197 кВт·ч, при горизонтальном размещении 0° – 163 кВт·ч, при вертикальном размещении солнечной панели 90° – 143 кВт·ч.

Все полученные данные занесены в таблицу 13.

Таблица 13 – Итоговая таблица сравнения вариантов

| Угол наклона к горизонту, ° | Суммарная солнечная радиация, кВт·ч/м <sup>2</sup> | Дневная солнечная радиация, кВт·ч/м <sup>2</sup> | Отдаваемая мощность солнечной панели, кВт·ч | Стоимость модуля, тг./Вт | Капитальные вложения, тг. |
|-----------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 0°                          | 1307                                               | 3,58                                             | 163                                         | 923                      | 280.395,0                 |
| 45°                         | 1815                                               | 3,58                                             | 197                                         | 923                      | 280.395,0                 |
| 90°                         | 1371                                               | 3,58                                             | 143                                         | 923                      | 280.395,0                 |

Стоимость модуля в трех вариантах одинакова, угол наклона влияет только на отдаваемую мощность. Оптимальный угол наклона 45° (см.рис. 42).

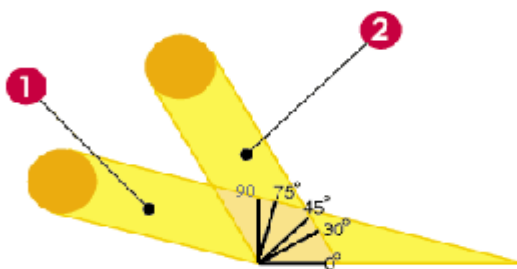


Рисунок 42 – Угол наклона солнца (1 – солнце зимой, 2 – солнце летом)

### 3.7 Электроснабжение ИнЕУ с помощью панелей PWM-230W

На южной стороне фасада здания ИнЕУ возможно разместить 136 шт. солнечных панелей «PWM-230W», номинальной мощностью 230 Вт. каждая (см. рис.43). Габаритные размеры «PWM-230W» ВхШ - 1706х944 мм.

Параметры PWM-230W, при оптимальных погодных условиях (температура поверхности фотоэлемента 25°C, солнечная радиация близка к своему максимальному значению в 1000W/m2):

Пиковая мощность 230 Вт.;

напряжение холостого хода 45,8 В.;

Максимальная мощность при напряжении 36,2 В.;

Ток короткого замыкания 6,9 А;

Максимальная мощность при токе 6,35 А.

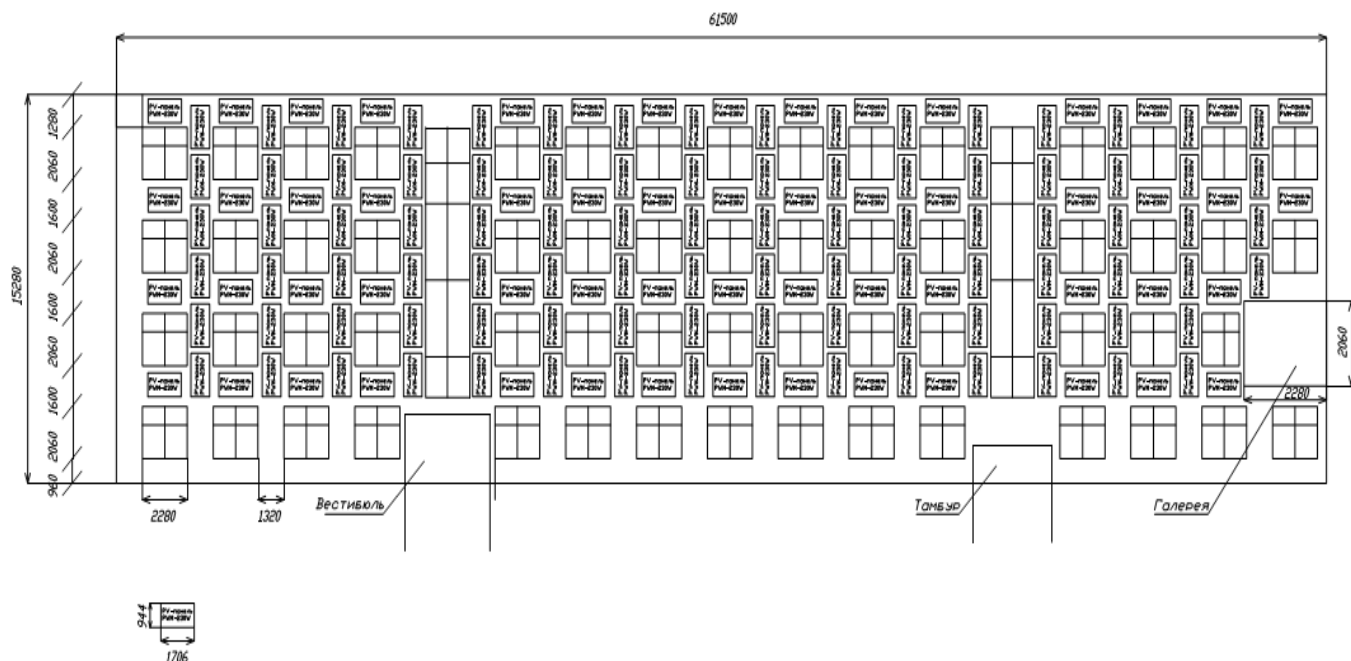


Рисунок 43 – Южная сторона фасада здания ИнЕУ с PWM-230W

При оптимальных погодных условиях от 136 шт. солнечных панелей «PWM-230W» можно получить до 31 280 Вт. Рассчитаем более точно, сколько мощности можно получить.

Количество электроэнергии вырабатываемой фотоэлектрической системой, можно получить по формуле:

$$W = k \cdot P_{\text{мод.}} \cdot t_{\text{солн.сиян.}} \cdot \quad (80)$$

где  $P_{\text{мод.}}$  – номинальная мощность солнечной панели, [Вт];

$t_{\text{солн.сиян.}}$  – продолжительность солнечного сияния, [час];

$k$  – коэффициент производительности системы:

0,8 – для систем, соединенных с сетью;

0,5 – 0,7 для гибридных систем;

0,2 – 0,3 для автономных систем, используемых круглый год.

Инсоляция, падающая на поверхность Земли, изменяется вследствие движения Солнца. Поток радиации зависит от времени суток, сезона года и погоды.

С помощью программы «Солнечный калькулятор» для г. Павлодар была вычислена продолжительность фактического солнечного сияния в месяц (часов), время восхода и захода, момент верхней кульминации и уравнение времени (см. пункт 3.4).

Подставим в формулу 1 полученные значения, получим вырабатываемую энергию от одной панели за январь месяц.

$$W_{\text{январ.}} = 0,8 \cdot 230 \cdot 250,28 = 46,051, \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Т.к. общее количество панелей «PWM-230W» 136 шт., помножив  $W_{\text{январь}}$  на количество панелей получим суммарную электроэнергию за январь месяц.

$$W_{\text{январь}} = 136 \cdot 46,051 = 6262,936, \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

Аналогично проведем расчет для остальных месяцев, полученные результаты занесем в таблицу 2.

Соответственно среднее значение вырабатываемой электроэнергии 9168,52 кВт·ч, при месячных колебаниях от 5791,555 кВт·ч в декабре до 12402,145 кВт·ч в июле (см. табл. 13).

Таблица 13 – Прогнозируемая электроэнергия от 136 шт. солнечных панелей

| № п/п | Название месяца | Солнечное сияние в месяц для г. Павлодар, часов | Вырабатываемая электроэнергия, кВт·ч |
|-------|-----------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1     | январь          | 250,28                                          | 6262,936                             |
| 2     | февраль         | 273,39                                          | 6841,311                             |
| 3     | март            | 361,59                                          | 9048,428                             |
| 4     | апрель          | 411,27                                          | 10291,620                            |
| 5     | май             | 481,41                                          | 12046,804                            |
| 6     | июнь            | 492,01                                          | 12312,058                            |
| 7     | июль            | 495,61                                          | 12402,145                            |
| 8     | август          | 446,38                                          | 11170,213                            |
| 9     | сентябрь        | 372,94                                          | 9332,451                             |
| 10    | октябрь         | 322,70                                          | 8075,245                             |
| 11    | ноябрь          | 257,65                                          | 6447,434                             |
| 12    | декабрь         | 231,44                                          | 5791,555                             |
| 13    | год             | 4395,67                                         | 110022,270                           |

В среднем стоимость солнечной панели 450 тенге за 1 Вт. С учетом доставки в г.Павлодар цена будет выше, 900 тенге за 1 Вт. В нашем случае потребуется 28 152 000 тенге на покупку 136 шт. панелей «PWM-230W».

Системы, производящие и потребляющие менее 2000 Вт·ч в день, лучше всего сочетаются с напряжением в 12 В. Системы, производящие 2000 – 6000 Вт·ч в день, обычно используют напряжение 24 В. Системы, производящие более 6000 Вт·ч в день, используют 48 В. Поэтому в нашем случае используется напряжение 110 В.

Инвертор превращает постоянный ток низкого напряжения в стандартный переменный (240 В, 50 Гц). Инверторы бывают от 250 Вт (стоимостью около 300 долларов) до свыше 8000 Вт (около 6 000 долларов). Инвертор может служить "буфером" между домом и коммунальной

энергосистемой, позволяя продавать избыток электроэнергии в общую электросеть.

Выходное напряжение солнечных панелей постоянное, поэтому необходим преобразователь постоянного напряжения в переменное. Инвертор трехфазный GUTOR Electronic LLC 10кВА серии WDW 3000 (см. рис. 44), с параллельным резервированием от сети 3х380 В.

Технические характеристики:

Выходная максимальная мощность – 10 кВА ;

Выходное напряжение – 3х380/400/415 В;

Диапазон входного постоянного напряжения – 110 В;

Допустимое отклонение входного напряжения – 20/-15%;

Напряжение на входе байпаса 3х380/400/415 В –  $\pm 10\%$ ;

Частота – 50/60 Гц  $\pm 6\%$ ;

Ток полной загрузки – 125А

Ток холостого хода -  $< 0,9\text{А}$

Номинальное напряжение на выходе – 220В, 5%

Выходная частота - 50 Гц с точность 0,5%

Выходной сигнал – модифицированный синус

КПД – 80%

Потребляемый ток без нагрузки – 0,9А

Время переключения – 15мс

Защита по низкому напряжению батареи –  $20\text{В} \pm 1,5\text{В}$

Защита по высокому напряжению батареи –  $29\text{В} \pm 1,5\text{В}$

Чтобы получить на инвертере входное постоянное напряжение – 110 В. соединим панели в 5 последовательно соединенных групп, состоящих из: первая и вторая группа 27 параллельно соединенных панелей, третья состоит из 28 параллельно соединенных панелей. Для резервирования питания в случае плохой погоды (облачность, дождь и т.д.) в трехфазном инверторе GUTOR 10кВА предусмотрено параллельное резервированное соединение с сетью. Напряжение на входе байпаса 3х380/400/415 В.

Стоимость такого инвертора очень высока 3 100 000 тенге.

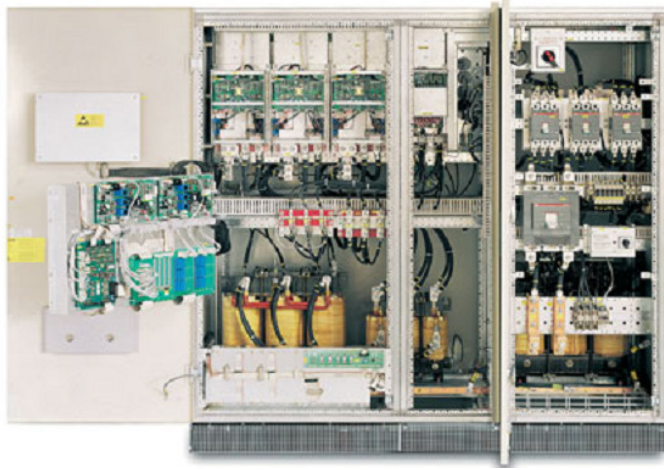


Рисунок 44 – трехфазный инвертор GUTOR 10кВА серии WDW 3000

Примерная комплектация станции ФЭС – 31 280 Ватт:  
солнечная панель PWM-230W, 230 Ватт – 136 шт.;  
трехфазный инвертор GUTOR 10кВА серии WDW 3000 – 1 шт.

Стоимость электроснабжения от солнечных панелей без учета монтажных работ 31 252 000 тенге.

С учетом того, что цена за один кВт·ч в городе Павлодар 8 тенге, данная система электроснабжения оправдает себя через 82 года, т.к. потребляемая мощность ИнЕУ - 47,482 кВт·ч в сутки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сказанного выше следует вывод о перспективности фотоэлектрической солнечной энергетики при условии быстрого удорожания стоимости электроэнергии от традиционных источников энергии. Солнечное излучение является практически неисчерпаемым источником энергии, оно поступает во все уголки Земли, находится "под рукой" у любого потребителя и является экологически чистым доступным источником энергии.

К настоящему времени достигнут большой прогресс в преобразовании солнечной энергии различными методами. Проведение эффективной политики ускорения перехода к солнечной энергетике является разумной стратегией в условиях всевозрастающего беспокойства по поводу состояния окружающей среды. Солнечная энергетика при ее повсеместном внедрении приводит к формированию нового типа культуры, когда экологические ценности выйдут на первое место.

Государственная помощь должна оказываться как фундаментальной, так и прикладной науке, а также внедрению в промышленность технических решений: нужно поощрять разработку, размещение и эксплуатацию системы солнечной энергетики. Выполненные проекты должны стимулировать прогресс технологии и развитие производственных мощностей, при этом затраты должны быть поделены между государством, производителями и потенциальными потребителями.

Основные результаты работы заключаются в нижеследующем.

Выработана программа расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную произвольно ориентированную поверхность. Программа позволяет рассчитывать потоки коротковолновой радиации в многокомпонентной замутненной облачной атмосфере с учетом многократного рассеяния и поглощения.

Разработана комбинированная система автономного электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии.

Исходя из условий потребления электроэнергии лабораторией «Возобновляемая энергетика» 47,482 кВт·ч в день, необходимую мощность могут обеспечить:

- 10 солнечных панелей, номинальной мощностью 155 Вт каждая и суммарной площадью 12,88 кв.м.;
- ветрогенератор номинальной мощностью 1 кВт при скорости ветра 12,5 м/с. В целях достижения надежного бесперебойного электроснабжения лаборатории предусмотрен резерв, представляющий собой электрическую сеть, вводимый в действие устройством автоматического включения резерва – АВР.

Проведено экспериментальное исследование солнечной панели «SW 155 mono» в г. Павлодар.

В день от солнечной панели «SW 155 mono» можно получить мощность с марта по октябрь 2,4 кВт·ч – 7,51 кВт·ч в день. В осенне-зимние месяцы с ноября по февраль отдаваемая мощность низкая в пределах 0,79 – 1,78 кВт·ч.

Выполнено моделирование режимов работы солнечной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33».

С помощью программы «PVSYST 4.33» была построена ВАХ солнечной панели «SW 155 mono», производства фирмы «Solar World». Программа автоматически считает номинальную мощность, актуальную мощность, потери мощности и результирующую ВАХ.

Также с помощью «PVSYST 4.33» можно построить ВАХ с указанием максимально возможной выработкой электроэнергии в разное время дня.

Рассчитано возможное электроснабжение ИнЕУ с помощью станции фотопреобразовательной системы – 31 280 Ватт. Стоимость без учета монтажных работ составит 31 252 000 тенге. Данная система электроснабжения оправдывает себя только через 82 года.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. М.В. Солонович, Д.В. Мосияш, Е.В. Зигангирова. «Возможности использования фотоэлектрических преобразователей в г. Павлодар». Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2009. – Часть V. – 286 с.
2. В.Ю. Мельников, Д.В. Мосияш, А.С. Ермензин. «Оценка ветрового потенциала в условиях города Павлодара». Павлодар: ИнЕУ, 2009 – Т.1 – 244 с.
3. Renewable energy. Second edition. John Twidell & Tony Weir. Oxford University Press 2008. – 452 с.
4. Е.В. Зигангирова, Д.В. Мосияш, Р.Ж. Альназаров. «Определение солнечного потенциала для северных регионов Казахстана» // Материалы X Республиканской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых преподавателей: «Творчество молодых - инновационному развитию Казахстана», секция «Энергетика и Энергосбережение», г.Усть-Каменогорск.
5. А.С. Ермензин, Р.Ж. Альназаров. «Электроснабжение на основе возобновляемых источников энергии» // Материалы X Республиканской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых преподавателей: «Творчество молодых -инновационному развитию Казахстана», секция «Энергетика и Энергосбережение», г.Усть-Каменогорск.
6. Д.В. Мосияш, А.С. Ермензин и Р.Ж. Альназаров. «Гибридная система электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии» // Сборник с материалами участников второго республиканского конкурса проектов по энергосбережению и альтернативным источникам энергии среди учащихся, студентов, молодых специалистов и ученых, номинация «Молодые ученые».
7. Аронова, Е.С. Методика расчета реальной плотности солнечного излучения при проектировании фотоэлектрических энергоустановок. [Текст] / Е.С. Аронова, В.А. Грилихес // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - СПб. - 2006. - № 6. - Т. 1. Естественные и технические науки -С. 62-66.
8. Аронова, Е.С. Исследование систем автономного электроснабжения на базе солнечных фотоэлектрических установок с концентраторами излучения и многопереходными солнечными элементами. [Текст] / Е.С. Аронова // Возобновляемые источники энергии: материалы научной молодежной школы с международным участием - М.: Университетская книга, 2008. - Ч. I. - С. 34-40.
9. Кобелев А.В. Методика по использованию альтернативных и возобновляемых источников энергии // Электроэнергетика, энергосберегающие технологии: Матер. Всеросс. науч.-техн. конф. / ЛГТУ. Липецк, 2004. Ч. 2. С. 49 – 53.
10. Муста Л.Г. Программный комплекс для расчета солнечной радиации // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. Темат. Сб. тр. / СПбГАСУ, – СПб., 2008. – вып. 14. – С. 49–54.
11. Козлов А.В, Ковалевский В.К., Юрченко А.В. Результаты климатических испытаний солнечной батареи в натуральных условиях г. Томска.// Светотехника №1 2005. 4 стр. стр 37-41

12. Мировая энергетика: Прогноз развития до 2020 года /Под ред. Ю.И. Старшинова. М. Энергия, 1980.
13. Твайделл Д., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. М.: Энергоатомиздат, 1990.
14. Баскаков А.П. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Введение в специальность.: учеб. пособие. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004.
15. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Под ред. П. П. Безруких. С-Пб.: Наука, 2002.
16. Алферов Ж.И. Земные профессии Солнца / Ж.И. Алферов, А.В. Бородин. – М.: Сов. Россия, 1981. – 88 с.
17. Ушаков В.Г. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии / В.Г. Ушаков. – Новочеркасск: НГТУ, 1994. – 120 с.
18. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989.
19. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 8. С. 937–948.
20. Лосюк Ю.А. Нетрадиционные источники энергии. учебное пособие / Ю.А. Лосюк, В.В. Кузьмич// учебное пособие. —Мн.: УП «Технопринт», 2005. —234 с.
21. Альтернативная энергетика и экология ISJAE// «Столетний меморандум, 13 ноября 2006». - 2007, №3(47). - С. 11.
19. Журнал «Наука и жизнь», издательство «Правда», №10, 2002г.
20. Ш.Г.Зиятдинов Альтернативные источники энергии «ПС» Физика №25-26/03
22. Атлас. Целый мир в твоих руках. Выпуск 10, 2010
23. Леонтович М. А. О предельном коэффициенте полезного действия при прямом использовании излучения // УФН. 1974. Т. 114. № 3. С. 555–558.
24. Байерс Т. - 20 конструкций с солнечными элементами, 1988.
25. Ж. Симон, Ж.-Ж. Андре - Молекулярные полупроводники фотоэлектрические свойства и солнечные элементы, 1988.
26. Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис - Полупроводниковая оптоэлектроника, 1976.
27. А. В. Наумов - Производство фотоэлектрических преобразователей и рынок кремниевого сырья в 2006 - 2010 гг, 2006.
28. О. Кудрявцева - Расчёт КПД солнечных элементов на основе аморфного кремния, 1996.
29. В.А. Воронцов - Спектральная чувствительность и вольт-амперная характеристика солнечного элемента, 1999.
30. Peter Wurfel - Physics of Solar Cells 2005.
31. Фаренбух А., Бьюб Р. «Солнечные элементы: Теория и эксперимент»
32. Грилихес В.А., Орлов П.П., Попов Л.Б. Солнечная энергия и космические полеты. М.: Наука, 1984.
33. Колтун М.М. Солнечные элементы. М.: Наука, 1987.

34. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985.
35. Салтымаков М.С., Ремнёв Г.Е., Ивонин И.В., Найден Е.П., Юрченко В.И. Полупроводниковые плёнки InP полученные методом импульсного ионного осаждения // Материалы международной конференции «Физико-химические процессы в неорганических материалах». – Кемерово: Кузбассиздат, 2007. Т. 2. – С. 351 – 354.
36. Веб-сайт фирм General Monitors Inc. <http://generalmonitors.com>, Nippon Soken Inc. <http://www.nipponsocket.com>
37. Вуль А.Я., Козырев С.В., Федоров В.И. Особенности фотоэлектрических свойств туннельных МДП структур. Основные соотношения теории//ФТП.-1981.-т.15.-С. 142.
38. Crowell C.R. , Spitzer W.G., Howarth L.E. , Labate E. Attenuation length measurements of hot electrons in metal films // Phys. Rev.-1962.- v.127, pp.2006-2010.
39. Альтернативная энергетика и экология ISJAE// «Столетний меморандум, 13 ноября 2006». - 2007, №3(47). - С. 11.
40. Sah S.T. Carrier generation and recombination in p-n junctions and p-n junction characteristics//Proc. IRE.-1957.- Vol.45. №9.-p. 1228
41. Зи С., Физика полупроводниковых приборов т.1, пер. с англ. Сурица Р.А. – М.: Мир, 1984. - 456 с
42. Беляков Л.В., Горячев Д.Н., Срессели О.М., Ярошецкий И.Д. Светочувствительные структуры Шоттки на пористом кремнии//ФТП.-1993.- т.27.-С.1371
43. Солнечная энергетика. Под ред. Ю.Н. Малевского, М.М. Колтуна. М.: Мир, 1979, 220 с.
44. Замаев К.И., Пармон В.Н. В кн.: Преобразование солнечной энергии. Под ред. Н.Н. Семенова. Черногловка: Изд-во ИХФ АН СССР, 1981, с. 43—82.
45. Hering G. Photon International, 2007, № 1, p. 50.
46. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Физ. и техн. полупроводников, 2004, т. 38, № 8, с. 937—948.
47. Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Л.: Наука, 1989, 310 с.
48. Бакулин А.А., Ходарев А.Н., Мартыанов Д.С., Елизаров С.Г. Головин И.В., Парашук Д.Ю., Арнаутов С.А., Нечволодова Е.М. Докл. АН, 2004, v. 398, № 6, p. 774—776.
49. Wang J.A., Limas-Ballesteros R., Lopez T., Moreno A., Gomez R., Novaro O., Bokhim X. J. Phys. Chem. B., 2001, v. 105, p. 9692—9698.
50. An EPRI Technology Innovation White Paper. December, 2007. Solar Photovoltaics. Expanding Electric Generation Options.

## Содержание

|     |                                                                                                                     |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|     | Введение                                                                                                            | 3  |
| 1   | Солнечная энергетика                                                                                                | 7  |
| 1.1 | Солнечная радиация                                                                                                  | 7  |
| 1.2 | Потенциал и перспективы использования солнечной энергии в Республике Казахстан                                      | 10 |
| 1.3 | Классификация солнечных энергетических установок и их особенности                                                   | 14 |
| 2   | Принцип действия, конструкция и направление применения фотопреобразовательной системы                               | 17 |
| 2.1 | Переходы в полупроводниках фотоэлектрических элементов, работа солнечного элемента                                  | 17 |
| 2.2 | Основные характеристики фотоэлектрохимического элемента                                                             | 23 |
| 2.3 | Прямое преобразование солнечной энергии в электрическую                                                             | 27 |
| 2.4 | Полупроводниковые материалы фотоэлементов                                                                           | 30 |
| 3   | Моделирование и экспериментальное исследование автономной фотопреобразовательной системы                            | 33 |
| 3.1 | Математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную приемную площадку               | 33 |
| 3.2 | Расчет эффективного значения плотности потока солнечного излучения                                                  | 39 |
| 3.3 | Комбинированная система электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии                                | 42 |
| 3.4 | Экспериментальное исследование солнечной панели «SW 155 mono» в г. Павлодар                                         | 49 |
| 3.5 | Расчет требующейся площади модулей солнечных панелей для обеспечения энергией двух вариантов локальных потребителей | 52 |
| 3.6 | Моделирование режимов работы солнечной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33»                | 60 |
| 3.7 | Электроснабжение ИнЕУ с помощью панелей PWM-230W                                                                    | 69 |
|     | Заключение                                                                                                          | 74 |
|     | Список использованных источников                                                                                    | 76 |

# **ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

## **МАГИСТРАТУРА**

Кафедра: «Электроэнергетика»

Магистерская диссертация

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

6N0718 «Электроэнергетика»

Магистрант \_\_\_\_\_ Р.Ж. Альназаров  
(подпись, дата)

Научный руководитель

Профессор, к.т.н. \_\_\_\_\_ В.Ю. Мельников  
(подпись, дата)

Допущен к защите:

Зав. кафедрой, д.т.н. \_\_\_\_\_ Е.В. Иванова  
(подпись, дата)

г. Павлодар, 2010 г

**Министерство образования и науки Республики Казахстан**  
**Инновационный Евразийский Университет**

**СТЕНОГРАММЫ**

**заседания Государственной Аттестационной Комиссии  
защиты магистерских диссертаций  
по специальности 6N0718 «Электроэнергетика»**

Павлодар 2010г.

**Министерство образования и науки Республики Казахстан**  
**Инновационный Евразийский Университет**

**СТЕНОГРАММА**

**заседания Государственной Аттестационной Комиссии  
защиты магистерской диссертации  
по специальности 6N0718 «Электроэнергетика»**

**4 июня 2010 г.**

**Под председательством  
кандидата технических наук,  
главного специалиста  
ПО «Казахэнергоэкспертиза»  
Токомбаева Т. Ж.**

**Повестка дня:  
Защита магистерской диссертации  
на соискание академической степени  
магистра электроэнергетики  
Альназарова Р.Ж. на тему  
«Моделирование и экспериментальное  
исследование автономной  
фотопреобразовательной системы».**

**Павлодар 2010г.**

**СТЕНОГРАММА**  
заседания Государственной аттестационной комиссии  
защиты магистерской диссертации  
по специальности 6N0718 «Электроэнергетика»

**Председатель ГАК** - кандидат технических наук, главный специалист  
ПО «Казахэнергоэкспертиза» Токомбаев Тулеген Жумабекович

**Члены ГАК**

1. Иванова Елена Васильевна, доктор технических наук, профессор
2. Мельников Виктор Юрьевич, кандидат технических наук, профессор.
3. Калиев Бакытбек Зейнелькабиденович, кандидат технических наук, профессор.

**Секретарь ГАК** - магистр электроэнергетики Волошанин Геннадий Геннадьевич

**Председатель ГАК :**

Уважаемые коллеги! Объявляется защита магистерских диссертаций.

В ГАК были представлены следующие документы:

- 1) Завершенная диссертационная работа;
- 2) Приказ об утверждении темы;
- 3) Две рецензии ученых являющихся специалистами в области научного исследования;
- 4) Транскрипт;
- 5) Реферат;
- 6) Список научных публикаций и их копии.

Экспертная комиссия дала своё письменное заключение о рекомендации диссертации к публичной защите.

К защите приглашается магистрант Альназаров Расул Жанабекович.

**Секретарь ГАК:**

Слово предоставляется магистранту Альназарову Расулу Жанабековичу для представления диссертационной работы на тему: «Моделирование и экспериментальное исследование автономной фотопреобразовательной системы».

Соискатель Альназаров Р.Ж. излагает основные положения магистерской диссертации.

**Председатель ГАК:**

Спасибо за доклад. Прошу задавать вопросы по содержанию диссертационной работы соискателю. Пожалуйста, Калиев Бахытбек Зейнелькабиденевич, к.т.н., проф.

**Калиев Бахытбек Зейнелькабиденевич, к.т.н., проф.:**

**Вопрос:** Почему для электроснабжения университета ИнЕУ выбраны солнечные панели мощностью PWM-230, 230 Вт., в магистерской работе рассматривалось эффективность использования в климатических условиях г. Павлодар солнечных панелей «SW 155 mono», 150 Вт.?

**Ответ:** Предложенный вариант электроснабжения университета ИнЕУ с помощью панелей 230 Вт. будет эффективнее. Суммарная вырабатываемая мощность PWM-230 230 Вт. достигает значения 31,28 кВт. Такое же количество панелей мощностью 155 Вт. даст меньше электроэнергии примерно на 30%. Это выгоднее тем более что панели 230 Вт. не намного дороже панелей мощностью 155 Вт.

**Иванова Елена Васильевна, д.т.н., проф.:**

**Вопрос:** Вы рассматривали, по габаритным размерам солнечные панели подойдут для размещения на фасаде университета. Они не будут закрывать оконные проемы?

**Ответ:** Нет на представленном чертеже четко по размерам представлено их возможное расположение. Установка панелей не приведет к затенению дневного света в учебных кабинетах.

**Иванова Елена Васильевна, д.т.н., проф.:**

**Вопрос:** Рассматривалось только 3 варианта угла наклона солнечной панели «SW 155 mono», почему вы не рассмотрели угол наклона равный широте г.Павлодара  $52^{\circ}18'$ ? Ведь известно, что оптимальный угол наклона равен широте местности, где панель устанавливается.

**Ответ:** Угол наклона солнечной панели  $52^{\circ}18'$  не рассматривался, в программе «PVSYST 4.33» был исследован приход солнечной радиации на панель «SW 155 mono» только при угле наклона  $0^{\circ}$ , под углом  $45^{\circ}$  и при вертикальном угле  $90^{\circ}$ . Эти 3 положения были взяты, чтобы выявить закономерность изменения отдаваемой мощности солнечной панели. В результате получилось, что из рассматриваемых углов наклона, оптимальный

будет  $45^{\circ}$ , отдаваемая мощность панели 197 кВт·ч. При угле  $52^{\circ}18'$  отдаваемая мощность будет, безусловно, выше, но незначительно. С замечанием согласен, нужно было рассмотреть большее количество, в том числе угол наклона равный широте г.Павлодара.

**Иванова Елена Васильевна, д.т.н., проф.:**

**Вопрос:** Я попытаюсь опровергнуть Ваши результаты, покажите страницу 13, на первый взгляд оптимальным углом является угол  $0^{\circ}$ . Насколько достоверны Ваши результаты расчета?

**Ответ:** Программой «PVSYST 4.33» пользуются во всем мире. В лаборатории «Возобновляемая энергетика» ее установил профессор из Греческого университета Петерос Аксолопулос в рамках программы «Tempus Tasis». «Technological Educational Institution of Athens» является одним из передовых университетов по исследованию солнечной радиации. Полученные данные верны с достаточно высокой точностью. Солнечная панель ориентирована к южной стороне света. Так как солнце проходит с востока на запад по южной стороне солнечная панель освещается постоянно и при угле наклона в  $45^{\circ}$  вырабатываемая мощность будет больше чем при угле  $0^{\circ}$ .

**Калиев Бахытбек Зейнелькабиденович, к.т.н., проф.:**

**Вопрос:** Разрешите задать Вам вопрос, меня интересует электроснабжение университета ИнЕУ с помощью панелей PWM-230W, Вы говорите, что использование солнечных панелей мощностью 230 Вт. позволит сэкономить 880 тыс. тенге в год. Ведь покупка таких панелей стоит очень больших денег, нам никто не сможет подарить такое количество панелей. На чем основываются ваши результаты расчета?

**Ответ:** В год 136 шт. панелей мощностью 230 Вт. может выработать 110022,2 кВт·ч. Исходя из тарифа на электроэнергию в г. Павлодар 8 тенге за 1 кВт·ч в год можно экономить на электроэнергии 880 тыс. тенге в год. Эта цифра не учитывает покупку и монтаж 136 шт. панелей на фасаде университета ИнЕУ. В среднем стоимость солнечной панели 450 тенге за 1 Вт. С учетом доставки в г.Павлодар цена будет выше, 900 тенге за 1 Вт. В нашем случае потребуется 28 152 000 тенге на покупку панелей «PWM-230W». Стоимость инвертора 3 100 000 тенге. Данная система электроснабжения оправдает себя через 82 года, при условии что тариф на электроэнергию в г. Павлодар будет постоянным 8 тенге за 1 кВт·ч. Но ежегодно эта цифра увеличивается и срок окупаемости будет равным примерно 45 лет.

**Шапкенов Бауыржан Кайдарович, к.т.н., проф.:**

**Вопрос:** Скажите рассматриваемая Вами солнечная панель «SW 155 mono», она зависит от спектра излучения света, например от инфракрасного?

**Ответ:** Монокристаллическая панель «SW 155 mono» не зависит от спектра излучения света. Выходная мощность 155 Вт., при оптимальных погодных условиях – температура поверхности фотоэлемента 25°C, солнечная радиация близка к своему максимальному значению в 1000W/m<sup>2</sup>. при меньшей интенсивности света выходная мощность будет ниже.

**Шапкенов Бауыржан Кайдарович, к.т.н., проф.:**

**Вопрос:** От каких параметров зависит количество солнечной энергии?

**Ответ:** Количество солнечной энергии зависит от географического месторасположения участка: чем ближе к экватору, тем оно больше. Количество солнечной радиации существенно различается в зависимости от времени года и географического положения. Этот фактор необходимо учитывать при использовании солнечной энергии.

**Иванова Елена Васильевна, д.т.н., проф.:**

**Вопрос:** 923 тенге за 1 Вт. это очень дорого, какова минимальная стоимость на сегодняшний день одной солнечной панели, например «SW 155 mono»?

**Ответ:** 923 тенге за 1 Вт. это действительная стоимость в Казахстане на сегодняшний день, рассматриваемой панели «SW 155 mono» производства фирмы «Solar World». Они выполняются из высококачественного кремния, надежны в эксплуатации, срок службы таких панелей 20 – 25 лет. Благодаря современным технологиям производители солнечных панелей на западе добились стоимости 1 доллар или 150 тенге за 1 Вт. Но все равно в РК эта стоимость будет на порядок выше в пределах 400-500 тенге за 1 Вт. из-за растамаживания при привозе в Казахстан, доставки и небольшого применения солнечных панелей.

Стоимость в дальнейшем будет уменьшается из-за увеличивающегося КПД, внедрения новых технологий, большего использования таких нетрадиционных источников энергии.

**Шапкенов Бауыржан Кайдарович, к.т.н., проф.:**

**Вопрос:** За сколько лет окупается солнечная установка?

**Ответ:** Гелиоустановки имеют большой срок окупаемости 5 – 10 лет из-за низкого коэффициента использования при высокой стоимости. Срок окупаемости зависит от цены на топливо — с ее ростом он сокращается. По истечении срока окупаемости установка дает чистую прибыль. Следует

иметь в виду, что для сокращения срока окупаемости установка должна использоваться большую часть года.

**Председатель ГАК:**

Представляю вашему вниманию отзыв на данную магистерскую диссертацию Олейника Сергея Ивановича, кандидата технических наук, главного инженера ТОО «Павлодартехэнерго».

Секретарь ГАК зачитывает отзыв Олейника С.И.

**Председатель ГАК:**

Спасибо. Соискатель, Вы согласны с замечаниями?

**Соискатель Альназаров Р.Ж.:**

Да, со всеми замечаниями согласен.

**Председатель ГАК:**

Слово предоставляется Дробинскому Александру Васильевичу, кандидату технических наук, профессору ИнЕУ.

**Дробинский Александр Васильевич, к.т.н, проф.**

Диссертационная работа Альназарова Р.Ж. посвящена компьютерному моделированию и экспериментальному использованию автономной фотопреобразовательной системы.

Замечания: приводимый в приложении материал на многих местах неразборчив, так как отсканирован в виде рисунка в мелком масштабе.

В текстовой части проекта содержатся орфографические ошибки и опечатки. Ссылки на приложения по содержанию не соответствуют содержанию основного текста в некоторых местах первого и второго разделов.

В целом, не смотря на имеющиеся недоработки объем материала, приводимого в диссертации, соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям.

Магистерская диссертация может быть допущена к защите.

Магистерская диссертация заслуживает оценки «отлично».

Магистрант достоин присуждения академической степени магистра электроэнергетики.

**Председатель ГАК:**

Спасибо. Соискатель, Вы согласны с замечаниями?

**Соискатель Альназаров Р.Ж.:**

Да, со всеми замечаниями согласен.

**Председатель ГАК:**

Слово предоставляется научному руководителю Мельникову Виктору Юрьевичу, кандидату технических наук, профессору.

**Научный руководитель:**

Уважаемые коллеги, государственная аттестационная комиссия! Работа, безусловно, вызвала очень серьезный интерес, и этот интерес на самом деле существует. Почему, потому, что использование в Казахстане солнечных преобразовательных панелей практически нет.

Соискатель, на мой взгляд, свою часть задачи решил. Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно.

Что касается, объема работы, то он соответствует предъявляемым требованиям к магистерским диссертациям, и надо рассматривать как магистерскую диссертацию, то есть как определенную квалификационную работу.

Работа имеет актуальность, безусловно. Научную новизну и практическую ценность мы определили. Предлагаю работу оценить на «отлично» и присвоить академическую степень магистр электроэнергетики.

**Научная дискуссия по диссертации**

**Председатель ГАК:**

Кто хочет высказаться по теме диссертационной работы.

**Иванова Елена Васильевна, д.т.н., проф.:**

Я считаю что, необходимо дорабатывать, не останавливаться на достигнутом и выйти на докторскую диссертацию. Это у Вас уже будет законченный хороший труд.

В принципе, все, что нам показал здесь магистрант - это реально его исследование. Прделанная работа Альназаровым Расулом довольно объемная и соответствует требованиям, предъявляемым к защите

магистерской диссертации. Поэтому предлагаю проголосовать за присвоение Альназарову Р.Ж. ученой степени магистр.

**Калиев Бахытбек Зейнелькабиденович, к.т.н., проф.:**

Я считаю, что определенная работа проведена. Лично я присоединяюсь к Елене Васильевне, и Альназарову Р.Ж. предлагаю продолжать работать в данном направлении, а работу оценить на «отлично» и присвоить соискателю академическую степень магистра электроэнергетики.

**Председатель ГАК:**

Прошу поддержать коллег и проголосовать за присвоения Альназарову Р.Ж. академической степени магистра электроэнергетики.

**Секретарь ГАК**

Слово предоставляется соискателю Альназарову Р.Ж. для заключительного слова.

**Альназаров Р.Ж., магистрант:**

Позвольте поблагодарить Вас за представленную возможность, выступить перед Вами. Спасибо, за кредит доверия – присвоение академической степени магистра электроэнергетики. Надеюсь, что в будущем, в трудовой деятельности я оправдаю его.

**Председатель ГАК:**

Защита магистерской диссертации магистранта Альназарова Расула Жанабековича окончена. Прошу перейти к закрытому голосованию.

**Перерыв на голосование.**

**После перерыва**

**Председатель ГАК:**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Государственной аттестационной комиссии по специальности 6N0718 – Электроэнергетика по диссертации Альназарова Расула Жанабековича на тему «Моделирование и экспериментальное исследование автономной фотопреобразовательной системы», представленной на соискание академической степени магистра электроэнергетики:

– оценить защиту магистерской диссертации Альназарова Расула Жанабековича на «отлично», А , балл – 4,0 и присвоить Альназарову Расулу Жанабековичу академическую степень магистр электроэнергетики.

*/Заключение принято единогласно/*

Научный руководитель

к.т.н., проф.  
Мельников В.Ю.

Секретарь ГАК

магистр электроэнергетики  
Волошанин Г.Г.

## Выступление магистранта Альназарова Р.Ж. с докладом:

Здравствуйте! Уважаемые члены Государственной аттестационной комиссии Вашему вниманию представлена диссертация на тему: «Моделирование и экспериментальное исследование автономной фотопреобразовательной системы».

Содержание презентации:

1. Актуальность темы;
2. Потенциал и перспективы использования солнечной энергии в Республике Казахстан;
3. Математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную приемную площадку;
4. Моделирование режимов работы солнечной панели «SW 155 mono» в программе «PVSYST 4.33»;
5. Экспериментальное исследование солнечной панели «SW 155 mono» в г. Павлодар;
6. Расчет электроснабжения ИнЕУ с помощью панелей PWM-230W;
7. Заключение.

*Актуальность темы:*

Уже сегодня можно сказать, что солнечная энергия является серьезной альтернативой традиционной энергетике. Солнце – является гигантским термоядерным реактором, который потребляет каждую секунду примерно 4 миллиона тонн водорода, превращая его в гелий. В результате выделяется огромное количество энергии, излучаемой в виде солнечной радиации.

Основная часть этой энергии испускается в виде электромагнитного излучения в диапазоне волн 0,2–3 мкм. Вблизи Земли на каждый квадратный метр поверхности, приходится в среднем до 1,4 кВт лучистой энергии.

Фотоэлектрические установки находят все более широкое применение как источник электроэнергии для малых и средних потребителей автономного энергоснабжения. Согласно прогнозу установленная мощность ФЭ должна вырасти к 2030 г. почти на два порядка и составить 1000 млрд ватт.

Более 60 % территории Казахстана, особенно южный регион – это районы децентрализованного или ненадежного централизованного энергоснабжения, где основными источниками электроэнергии являются топливные электростанции. Альтернативой таким электростанциям могут выступать системы на основе солнечных фотоэлектрических установок, преобразующих солнечное излучение. Возможность такой замены подтверждается оценкой потенциала солнечных ресурсов Казахстана.

### *Потенциал и перспективы использования солнечной энергии в Республике Казахстан.*

Климат Казахстана характеризуется большим числом ясных дней (особенно летом) высокой температурой и незначительным количеством осадков в течении года. Однако для использования солнечного излучения только таких данных не достаточно, поэтому проведен анализ солнечной радиации в Казахстане. Территория РК характеризуется средней интенсивностью солнечной радиации. В реальных условиях облачности годовой приход суммарной солнечной радиации находится на уровне 1227 – 1523,2 кВт·ч/м<sup>2</sup> при общем увеличении с Севера на Юг. При этом вклад рассеянной радиации составит 40 – 50%. Доля прямой солнечной радиации изменяется на протяжении года. В период с ноября по февраль она составляет 20 – 40%, с марта по октябрь – 40 – 75%. Данные были получены с помощью программы «PVSYST 4.33».

Больше всего количества солнечной энергии на территории Казахстана в г. Кызылорда – 1523,2 кВт·ч/м<sup>2</sup>, само мало в г. Кокшетау – 1227 кВт·ч/м<sup>2</sup>, в г. Павлодаре – 1306,6 кВт·ч/м<sup>2</sup>. Среднегодовое значение солнечной радиации южного региона Казахстана не намного больше, чем в северной части. Это говорит о перспективности использования солнечной энергетики на всей территории РК.

### *Положительные и отрицательные факторы, влияющие на развитие фотоэнергетики.*

Положительно сказываются:

- ✓ Экологичность фотоэлектрических энергетических установок;
- ✓ Возможность использования в местах, где использование других источников электрической энергии невозможно;
- ✓ Нетребовательность к обслуживанию и длительный срок эксплуатации;
- ✓ Постоянное снижение цен на продукцию солнечной энергетики, связанной с ростом предложения на рынке;
- ✓ Постоянный рост потребительских цен на энергоносители, топливо, электроэнергию, газ;
- ✓ Постоянное совершенствование материальной базы, в особенности связанное с ростом КПД преобразования.

Негативно влияют:

- ✓ Высокая капиталоемкость, достаточно высокая «стартовая» цена;
- ✓ Полная непроработанность нормативно-правовой базы по вопросам промышленного использования солнечных генерирующих мощностей;
- ✓ Сильно ограниченная применимость солнечных энергетических установок из-за недостаточности гелиоэнергетических ресурсов в зимнее время;
- ✓ Безграмотность населения по вопросам возобновляемой и альтернативной энергетики, порождающая откровенное мошенничество при обработке заказов.

*Математическая модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную приемную площадку.*

Солнечная энергия распространяется в виде прямонаправленного потока солнечного излучения. Но в виду наличия атмосферы и подстилающей поверхности Земли солнечное излучение поступает уже в виде трех потоков солнечной энергии: прямая  $R_{пр}(t)$ , диффузная или рассеянная  $R_d(t)$  и отраженная  $R_{от}(t)$  от поверхности Земли.

Суммарный поток  $R_{\Sigma}(t)$  солнечного излучения на приемную площадку на поверхности Земли будет в каждый времени  $t$  складываться как:

$$R_{\Sigma}(t) = R_{пр}(t) + R_d(t) + R_{от}(t)$$

Максимальный приход прямого СИ на приемную поверхность ПП в течение любых календарных суток года ( $N_i$ ) при непрерывном времени  $t$  реализуется при условии, когда приемная поверхность постоянно ориентирована на Солнце, что соответствует условию:  $\theta^0 \equiv \beta^0 = 90^\circ - \alpha^0$

Высота Солнца ( $\alpha^0$ ) в любой момент времени суток:

$$\sin \alpha^0(t) = \sin \varphi^0 \cdot \sin \delta^0(n_i) + \cos \varphi^0 \cdot \cos \omega^0(t) \cdot \cos \delta^0(n_i)$$

Поток прямой солнечной радиации на произвольно ориентированную наклонную поверхность определяется формулой:  $S_s = S_m \cos i$

$$\cos i = \cos \alpha \sin h_c + \sin \alpha \cos h_c \cos \psi$$

Азимут солнца вычисляется по формулам:

$$\cos(\psi_c) = \frac{\sin h_c \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h_c \cos \varphi}$$

$$\sin(\psi_s) = \frac{\cos \delta \sin \theta}{\cos h_c}, \text{ где } \delta = 23,45 \cdot \sin(360 \cdot \frac{284+n}{365}) - \text{склонение солнца.}$$

С учетом формул прямая солнечная радиация равна:

$$S_s = S_m [\cos \alpha (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \theta) + \sin \alpha \{ \cos \psi_s (tg \varphi [\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \theta] - \sin \delta \sec \varphi) + \sin \psi_s \cos \delta \sin \theta \}]$$

Эту формулу удобно записать в следующем виде:

$$S_s = S_m (A_1 + B_1 \cos \theta + C_1 \sin \theta)$$

$$A_1 = \cos \alpha \sin \varphi \sin \delta + \sin \alpha \cos \psi_s (tg \varphi \sin \varphi \sin \delta - \sin \delta \sec \varphi)$$

$$B_1 = \cos \alpha \cos \varphi \cos \delta + \sin \alpha \cos \psi_s \cdot \sin \varphi \cos \delta \sin \delta \sec \varphi$$

$$C_1 = \sin \alpha \cdot \sin \psi_s \cdot \cos \delta$$

Часовые углы, определяющие моменты начала и конца освещения наклонной поверхности, являются корнями уравнения:

$$A_1 + B_1 \cos \theta + C_1 \sin \theta = 0$$

Для перехода к осредненным за сутки потокам солнечной радиации усредняется  $\cos i$ :

$$I_1 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} (A_1 + B_1 \cos \theta + C_1 \sin \theta) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{t_1}^{t_2} (A_1 + B_1 \cos \theta + C_1 \sin \theta) d\theta, \quad \theta = \frac{2\pi t}{T}$$

где  $t_1, t_2$  – корни уравнения

Так как модель дает средние суточные значения интенсивности солнечной радиации на горизонтальной поверхности  $Sh$ , то конечная формула для расчета будет следующей:  $S_s^c = S_h^c \frac{I_1}{h_c}$ ,

$$\text{где } \overline{h_c} = \frac{1}{T} \int_{-t_0}^{t_0} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \theta) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-t_0}^{t_0} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \theta) d\theta$$

Радиация, падающая на наклонную поверхность, может быть представлена в виде трех составляющих:

$$Q_s = S_s + D_s + R_s$$

$$D_s = \frac{D_h (1 + \cos \alpha)}{2}, \quad R_s = \frac{Q_h \cdot A \cdot (1 - \cos \alpha)}{2}$$

$D_s, R_s$  – диффузная радиация, приходящая на наклонную поверхность, рассеянная атмосферой и земной поверхностью соответственно,  $D_h$  – рассеянная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность;  $Q_h$  – суммарная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность;  $A$  – среднее месячное альбедо прилегающих участков земной поверхности.

Для максимизации прихода прямого солнечного излучения на приемную поверхность необходимо, чтобы угол падения Солнца  $\theta^0$  был равен  $90^\circ$ .

*Моделирование режимов работы солнечной панели «SW 155 топо» в программе «PVSYST 4.33».*

Существующие и проектируемые системы можно эффективно исследовать с помощью математических моделей (аналитических и имитационных), реализуемых на современных ЭВМ, которые в этом случае выступают в качестве инструмента экспериментатора с моделью системы.

С помощью программы, была построена ВАХ солнечной панели «SW 155 mono». Программа считает номинальную вырабатываемую мощность, потери мощности и результирующую ВАХ.

В программе «PVSYST 4.33» было смоделирована панель «SW 155 mono» при различных углах панели относительно горизонта. При горизонтальном угле наклона  $0^{\circ}$ , под углом  $45^{\circ}$  и при вертикальном угле  $90^{\circ}$ .

В итоге получилось: при фиксированном угле наклона  $45^{\circ}$  к горизонту среднегодовая выходная мощность – 197 кВт·ч, при горизонтальном размещении  $0^{\circ}$  – 163 кВт·ч, при вертикальном размещении солнечной панели  $90^{\circ}$  – 143 кВт·ч.

Все полученные данные занесены в таблицу. Стоимость модуля в трех вариантах одинакова, угол наклона влияет только на отдаваемую мощность. Оптимальный угол наклона  $45^{\circ}$ .

#### *Экспериментальное исследование солнечной панели «SW 155 mono» в г. Павлодар.*

В работе приведен расчет эффективности использования солнечной панели «SW 155 mono» в климатических условиях города Павлодара. А также рассмотрены перспективы использования солнечных панелей как альтернатива традиционным источникам электроэнергии.

В таблице дано фактическое число часов солнечного сияния в месяц в г. Павлодар. Данные получены с помощью программы «Солнечный калькулятор».

Солнечное излучение в различные периоды года на территории г. Павлодара ( $52^{\circ}18'$  сев. широты,  $76^{\circ}57'$  вост. долготы). Энергия солнечного сияния составляет 1221,4 на квадратный метр в год.

В день от солнечной панели «SW 155 mono» можно получить мощность: 2,4 кВт·ч – 4,51 кВт·ч в день с марта по октябрь. В осенне-зимние месяцы с ноября по февраль отдаваемая мощность низкая в пределах от 0,79 до 1,78 кВт·ч в день.

Недостаток фотоэлектрических панелей - это то что они могут работать только в дневное время и при свете Солнца. Для компенсации этого недостатка к системе подсоединяют аккумулятор. Он заряжается от солнечного генератора, запасает энергию и делает ее доступной в любое время. Даже в самых неблагоприятных погодных условиях энергия, сохраняемая в аккумуляторах, может питать необходимое оборудование.

Панель производит достаточно электричества, чтобы питать напрямую DC нагрузку в 125 Вт, в летнее время года и примерно 20 Вт в осенне-зимние месяцы. Также возможно кратковременное подключение большей нагрузки, например насос для перекачки воды; ночное освещение и т.д.

*Расчет электроснабжения ИнЕУ с помощью панелей PWM-230W.*

На южной стороне фасада здания ИнЕУ возможно разместить 136 шт. солнечных панелей «PWM-230W», номинальной мощностью 230 Вт. При оптимальных погодных условиях от 136 шт. солнечных панелей «PWM-230W» можно получить до 31,28 кВт. Более точное значение вырабатываемой мощности для каждого месяца, представлено в таблице.

В год такая миниэлектростанция может выработать 110022,2 кВт·ч. Это позволит сэкономить 880 тыс. тенге.

Среднее значение вырабатываемой электроэнергии 9168,52 кВт·ч, при месячных колебаниях от 5791,555 кВт·ч в декабре до 12402,145 кВт·ч в июле.

Выходное напряжение солнечных панелей постоянное, поэтому необходим преобразователь постоянного напряжения в переменное. Для этого применяется инвертор трехфазный GUTOR Electronic LLC 10кВА серии WDW 3000, с параллельным резервированием от сети 3х380 В. Чтобы получить на инвертере входное постоянное напряжение – 110 В. соединим панели в 5 последовательно соединенных групп, состоящих из: первая, вторая, третья и четвертая группы 27 параллельно соединенных панелей, пятая состоит из 28 параллельно соединенных панелей. В трехфазном инверторе GUTOR 10кВА предусмотрено параллельное резервированное соединение с сетью. Напряжение на входе байпаса 3х380/400/415 В.

#### *Заключение.*

Из сказанного выше следует вывод о перспективности фотоэлектрической солнечной энергетики при условии быстрого удорожания стоимости электроэнергии от традиционных источников энергии. Солнечное излучение является практически неисчерпаемым и экологически чистым, доступным источником энергии.

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

изложена модель расчета количества приходящей солнечной радиации на наклонную произвольно ориентированную поверхность;

экспериментальное исследование солнечной панели «SW 155 mono» в г. Павлодар;

моделирование солнечной панели «SW 155 mono» с использованием программы «PVSYST 4.33»;

рассчитано возможное электроснабжение университета ИнЕУ с помощью станции фотопреобразовательной системы – 31,280 кВт

Благодарю за внимание, мой доклад окончен.