

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
МАГИСТРАТУРА
Кафедра «Электроэнергетика»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ 1,55 кВт
6N0718 «Электроэнергетика»

Магистрант _____ Д.В. Мосияш
(подпись, дата)

Научный руководитель

к.т.н., профессор _____ В.Ю. Мельников
(подпись, дата)

к.т.н., доцент _____ Е.В. Зигангирова
(подпись, дата)

Допущен к защите:

зав. кафедрой

д.т.н., профессор _____ Е.В. Иванова
(подпись, дата)

Павлодар 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения

Введение

1 Энергетический потенциал солнечной радиации и физические основы его использования

1.1 Общая характеристика солнечной радиации

1.2 Определение солнечного потенциала Казахстана

1.3 Возможности использования фотоэлектрических преобразователей в г. Павлодар

1.4 Распределение солнечной активности по географическим широтам

1.5 Потенциал природных ресурсов Казахстана

1.6 Выводы

2. Физические основы процессов преобразования солнечной энергии

2.1 Интенсивность солнечного излучения

2.2 Фотоэлектрические свойства p-n перехода

2.3 Вольтамперная характеристика солнечного элемента

2.4 Наногетероструктурные фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии

2.5 Создание комплекса методик и средств для исследования наногетероструктурных солнечных элементов

2.6 Определение зависимости мощности ФЭП от солнечной интенсивности

2.7 Выводы

3 Комбинированная солнечно-ветровая система электроснабжения лаборатории «Возобновляемая энергетика»

3.1 Перспективы использования солнечно-ветровой системы электроснабжения

3.2 Определение общего потребления электроэнергии лабораторией

3.3 Мощность источника питания

3.4 Определение ветрового потенциала местности

3.5 Надежность электроснабжения

3.6 Капитальные вложения

3.7 Выводы

4 Автономные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии

4.1 Возможности создания автономных энергоустановок

4.2 Концепция автономной энергоустановки на ВИЭ

4.3 Математическое моделирование солнечно-ветровых автономных энергоустановок

4.4 Выводы

5 Моделирование фотопреобразовательной системы мощностью 1,55 кВт

5.1 Выводы

6 Заключение

Список используемых источников

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В данной магистерской работе использовались следующие обозначения и сокращения:

АВР – Автоматический ввод резерва

АКБ – Аккумуляторная батарея

АМ – Атмосферная масса

ВАХ – Вольтамперная характеристика

ВИЭ – Возобновляемые источники энергии

ВЭУ – Ветроэнергетическая установка

КПД – Коэффициент полезного действия

ЛВЭУ – Локальная ветроэнергетическая установка

МК – Металлургический кремний

СБ – Солнечная батарея

СЭ – Солнечный элемент

СФЭУ – Солнечная фотоэлектрическая установка

СЭУ – Солнечная энергетическая установка

ФЭ – Фотоэнергетика

ФЭП – Фотоэлектрический преобразователь

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергия представляет собой наиболее совершенный вид энергии, легко доставляемый потребителю и преобразуемый в другие виды энергии. Выработка электроэнергии традиционными способами путем сжигания топлива на тепловых и атомных электростанциях сопровождается химическим и радиационным загрязнением окружающей среды. При этом возникает также проблема «теплового загрязнения» Земли, поскольку сегодня бесспорным является заключение о том, что для предотвращения необратимых изменений климата планеты суммарная выработка энергии не должна превышать ~1 % от всей энергии, приходящей на Землю от Солнца. Возможности наращивания энергетического потенциала за счет строительства гидроэлектростанций ограничены гидроресурсами, а также необходимостью отчуждения под водохранилища значительных площадей плодородных земель. Решение проблемы управляемого термоядерного синтеза откроет человечеству доступ к неограниченному источнику энергии, однако перечисленные выше недостатки в той или иной степени будут присущи и термоядерным электростанциям.

В мире существует ряд природных ограничений. Так, если брать оценку количества топлива по трем категориям: разведанные, возможные, вероятные, то угля хватит на 600 лет, нефти - на 90, природного газа - на 50, урана - на 27 лет. Иными словами, все виды топлива по всем категориям будут сожжены за 800 лет. Предполагается, что к 2011 г. спрос на минеральное сырье в мире увеличится в 3 раза по сравнению с сегодняшним уровнем. Уже сейчас в ряде стран богатые месторождения выработаны до конца или близки к истощению. Аналогичное положение наблюдается и по другим полезным ископаемым. Если энергопроизводство будет расти сегодняшними темпами, то все виды используемого сейчас топлива будут истрачены через 130 лет, то есть в начале XXII в.

С развитием промышленности - основного потребителя энергетической отрасли, человечество начинает использовать все новые виды ресурсов, так называемые «нетрадиционные» источники энергии. К нетрадиционным источникам энергии относятся источники, не применяемые для коммерческого производства, электрической и тепловой энергии - солнечная и геотермальная энергия, гидроэнергия приливов и отливов, ветряная и другие нетрадиционные источники.

Использование этих источников энергии вызвано необходимостью значительных финансовых затрат на разведку новых месторождений, так как часто эти работы связаны с организацией глубокого бурения (в частности, в морских условиях) и другими сложными и наукоемкими технологиями. А также экологическими проблемами, связанными с добычей энергетических ресурсов.

Не менее важной причиной необходимости освоения альтернативных источников энергии является проблема глобального потепления. Суть ее заключается в том, что двуокись углерода (CO_2), высвобождаемая при сжигании угля, нефти и бензина в процессе получения тепла, электроэнергии и обеспечения работы транспортных средств, поглощает тепловое излучение

поверхности нашей планеты, нагретой Солнцем и создает так называемый парниковый эффект.

Солнечное излучение представляет собой практически неисчерпаемый источник энергии. Оно поступает во все уголки Земли и находится «под рукой» у любого потребителя. Спектр излучения Солнца близок к спектру абсолютно черного тела, нагретого до температуры — 5800 К, что намного превышает температуру окружающей среды, при которой это излучение используется (—300 К). Последнее означает, что предельный термодинамический КПД преобразователя солнечного излучения может быть близок к 100 %. Таким образом, солнечное излучение является экологически чистым, доступным источником энергии, обладающим высоким энергетическим потенциалом.

Актуальность темы заключается в следующем:

- солнечная фотоэнергетика - коммерчески перспективный рынок, зависимость отражена на рисунке 1;

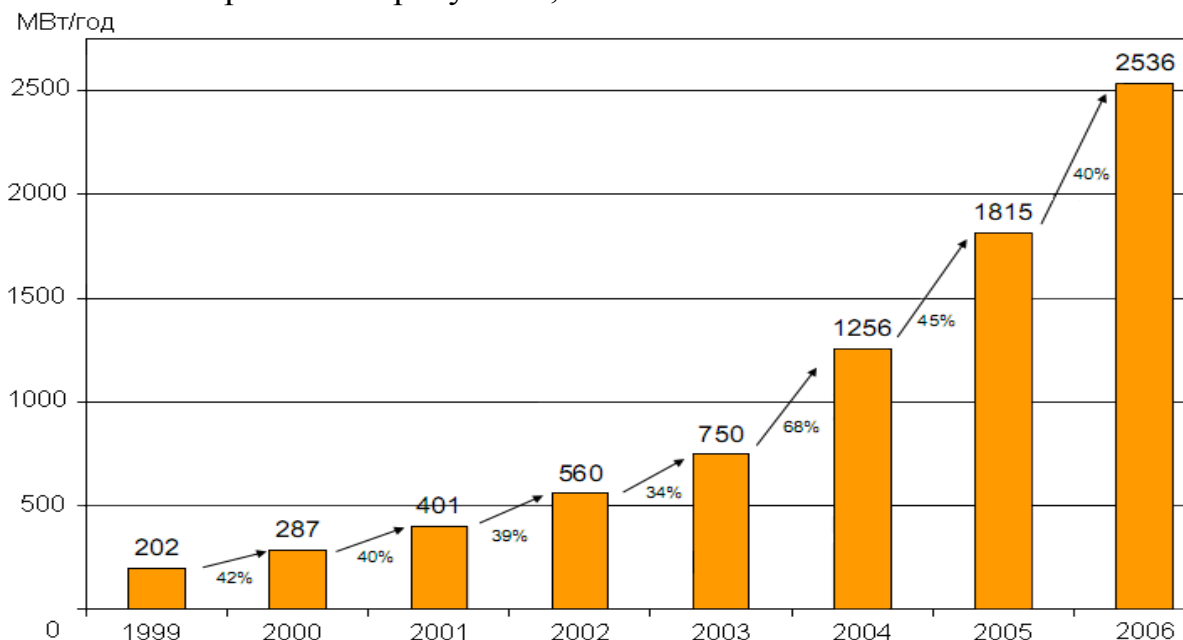


Рисунок 1 — Увеличение на 35-45% мирового годового производства солнечных фотоэлектрических систем в период 1999-2006 годы

- К середине века запасы нефти и газа будут близки к истощению;
- Увеличивающийся выброс двуокиси углерода в атмосферу должен быть остановлен благодаря развитию солнечной фотоэнергетики;
- Суммарная мощность фотоэнергосистем к 2020 году превысит 60 ГВт, а к 2050 году фотоэнергетика будет в числе основных энергетических отраслей [1].

Метод преобразования солнечной энергии в электрическую энергию с помощью полупроводниковых солнечных элементов (СЭ) является в настоящее время наиболее разработанным в научном и практическом плане. Он широко используется в системах энергопитания космических аппаратов и получает все большее применение в наземных условиях для обеспечения

электроэнергией автономных потребителей (переносная аппаратура, маяки, автоматические метеостанции и т. п.).

Впервые на перспективы использования фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии в крупномасштабной энергетике обратил внимание еще в тридцатых годах академик А. Ф. Иоффе. Однако в то время КПД солнечных элементов не превышал 1 %. В последующие десятилетия благодаря значительному объему исследований в области физики и технологии СЭ их КПД был увеличен до 20—25 %.

Очевидным недостатком солнечного излучения как источника энергии является неравномерность его поступления на земную поверхность, определяемая суточной и сезонной цикличностью, а также погодными условиями.



Рисунок 2 - Среднегодовое поступление солнечной радиации в некоторых районах Казахстана, России, Германии и Испании [1]

Еще недавно вопрос аккумуляции электроэнергии, вырабатываемой с помощью солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ), рассматривался как наиболее критичный при оценке перспектив крупномасштабной солнечной электроэнергетики вследствие необходимости равномерного энергоснабжения потребителей. Одним из приемлемых способов аккумуляции является использование электроэнергии для электролиза воды на водород и кислород с последующим хранением и расходом водорода в качестве обычного топлива или реагента в электрических топливных элементах. Сегодня благодаря успехам в области высокотемпературной сверхпроводимости можно говорить также и о возможности создания сверхпроводящих накопителей электроэнергии, выполняемых, вероятно, в комплексе со сверхпроводящими линиями электропередачи. Радикальным способом избавления от неравномерности выработки электроэнергии на солнечных энергоустановках является размещение СФЭУ в **околоземном космическом пространстве**. Находясь, например, на геостационарной орбите, СФЭУ практически все время будет освещена Солнцем и сможет вырабатывать в несколько раз больше электроэнергии, чем на Земле в самых благоприятных погодных условиях.

Вырабатываемая электроэнергия может при этом использоваться как непосредственно в космосе на промышленных спутниках, так и **транслироваться на Землю пучком СВЧ-излучения.**

Другим, еще более существенным недостатком солнечного излучения как источника энергии является его низкая плотность. Для выработки заметной электрической мощности, как в космосе, так и на Земле необходимо собирать солнечное излучение с больших площадей, покрывая их дорогими полупроводниковыми солнечными элементами. Стоимость получаемой таким образом электроэнергии значительно превосходит стоимость электроэнергии, вырабатываемой традиционными методами. Именно это является основной причиной, сдерживающей развитие крупномасштабной солнечной электроэнергетики.

Один из путей решения данной проблемы — снижение стоимости полупроводниковых материалов и СЭ. Исследования в этом направлении проводятся широким фронтом. Так, благодаря разработке прогрессивных технологий получения СЭ на основе монокристаллического кремния их стоимость снижена до величины менее 10 долларов за 1 Вт установленной пиковой мощности СФЭУ при коэффициенте полезного действия около 15 %. На основе ленточного поликристаллического, а также тонкопленочного аморфного кремния созданы СЭ с КПД до 13 %. Такие же значения КПД достигнуты в тонкопленочных СЭ на основе гетеропереходов $\text{CuInSe}_2\text{—CdS}$. Однако для внедрения данных СЭ в крупномасштабную энергетику необходимо решение ряда проблем, в первую очередь обеспечение воспроизводимости технологии получения дешевых СЭ и стабильности их параметров.

Другой путь снижения стоимости — снижение количества полупроводникового материала возможно путем увеличения эффективности солнечных элементов и при переходе к преобразованию концентрированного солнечного излучения. Сегодня эффективность каскадных солнечных элементов на основе гетероструктур составляет 35-40 %. Главная причина увеличения эффективности каскадных солнечных элементов заключается в том, что большая часть энергии солнечного излучения, попадающего на солнечный элемент, эффективно используется для получения электричества.

На пути практической реализации метода преобразования концентрированного солнечного излучения также возникает ряд проблем. Во-первых, при повышении мощности солнечного излучения пропорционально увеличивается плотность генерируемого в СЭ фототока, что требует усложнения конструкции СЭ для уменьшения омических потерь. Во-вторых, увеличивается тепловая нагрузка на СЭ, что требует создания эффективной системы теплоотвода. В-третьих, необходима разработка высокоэффективных и дешевых концентраторов излучения. В-четвертых, необходимо точное наведение и слежение установок за положением Солнца, что усложняет конструкцию и эксплуатацию СФЭУ. В то же время благодаря применению концентраторов появляется возможность использования в крупномасштабной солнечной электроэнергетике дефицитных и дорогих полупроводниковых

материалов, например арсенида галлия и твердых растворов на его основе, обеспечивающих получение термостабильных сильноточных СЭ с высоким КПД. Повышение освещенности приводит к дополнительному росту КПД, а также позволяет использовать эффект комбинированного термического, фотонного и инжекционного отжига радиационных дефектов, возникающих при эксплуатации СФЭУ в космосе. Поскольку при этом используются СЭ сравнительно небольшой площади, появляется возможность обеспечить их более эффективную защиту от неблагоприятных факторов окружающей среды, в частности за счет экранирующего действия концентраторов.

Актуальность использования солнечной энергии для Казахстана: инсоляция солнечной радиации во многих районах Казахстана больше, чем в Южной Европе

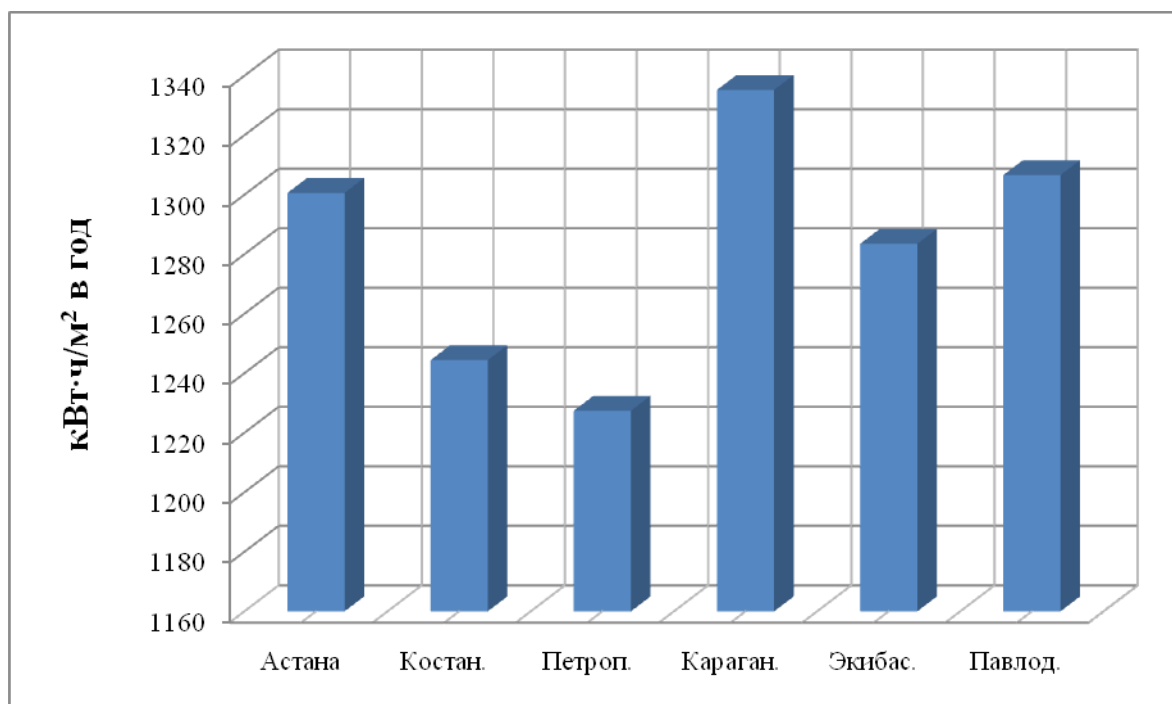


Рисунок 3 - Диаграмма поступления прямой солнечной радиации для различных городов Казахстана

Солнечной энергии, поступающей на территорию Казахстана достаточно для использования её как в промышленных, так и в частных целях. Это еще раз подтверждает актуальность использования фотопреобразовательных систем в Казахстане [2]. Поэтому тема диссертации является **актуальной**.

Исследования А. Ф. Иоффе, Ж. И. Алферова, В.М Андреева, В.А. Грилихеса, В.Д. Румянцева В.М Лантратова, М.З. Шварц Н.Х. Тимошиной и др. охватывают различные аспекты преобразования и использования солнечной энергии.

Объектом исследования является фотопреобразовательная система мощностью 1,55 кВт.

Идея работы заключается в обновлении метеобаз компьютерных программ собственными метеоданными. Моделирование

фотопреобразовательной системы на основе этих программ, с изменением входных параметров.

Целью работы является разработка и создание фотопреобразовательной системы мощностью 1,55 кВт, для обеспечения автономного и независимого электроснабжения потребителя. Для достижения этой цели в работе ставились и решались следующие задачи:

- исследование в области солнечного потенциала Казахстана и города Павлодара в частности, математическая обработка результатов измерений;
- исследования физических основ преобразования солнечной энергии;
- экспериментальное исследование работы ФЭП, обработка полученных результатов с помощью компьютерных программ;
- разработка комплекса методик и средств для исследования наногетероструктурных солнечных элементов;
- компьютерное моделирование параметров ФПС с помощью специализированных программ PVSYST и TRANSYS;
- разработка и создание солнечно-ветровой системы электроснабжения лаборатории «Возобновляемая энергетика»;
- разработка автономных энергоустановок на возобновляемых источниках энергии.

Методы исследования. В процессе выполнения исследований применялись: научно-техническое обобщение литературных источников, методы теоретических основ электротехники и теории электрических сетей, экспериментальные исследования выполнялись комплексным методом с использованием датчиков солнечной радиации (пиранометра) с разным углом наклона и специализированных программ для расчётов на компьютере.

На защиту выносятся:

- 1 Комбинированная солнечно-ветровая система электроснабжения лаборатории «Возобновляемая энергетика»;
- 2 Автономные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии;
- 3 Моделирование ФПС мощностью 1,55 кВт.

Научная новизна работы заключается в развитии теоретических и практических основ в ФЭ. В рамках решаемой автором научной задачи она характеризуется следующим новым научным положением:

- разработаны автономные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии, а также комбинированная солнечно-ветровая система электроснабжения лаборатории «возобновляемая энергетика».

Практическая ценность работы заключается в том, что внедрение следующих новых научных положений в проектную и эксплуатационную практику обеспечивает надежное автономное электроснабжение потребителей.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных и Республиканских конференциях: IX Республиканская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Творчество молодых

– инновационному развитию Казахстана» (г. Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2009 г.), международной научно-практической конференции «Индустриально-инновационное развитие на современном этапе: состояние и перспективы» (г. Павлодар, Республика Казахстан, 2009 г.), XXXVI научно-практическую конференцию Малой академии наук Республики Казахстан «Интеграция образования и науки – шаг в будущее», (г. Павлодар: ИнЕУ, 2010 г.), X Республиканская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана» (г. Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2010 г.), а также обсуждалась и докладывалась на «Втором республиканском конкурсе проектов по энергосбережению и альтернативным источникам энергии среди учащихся, студентов, молодых специалистов и ученых» (г. Алматы, 2010 г.).

Публикации. Содержание работы изложено в пяти научных статьях.

1 ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ И ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

1.1 Общая характеристика солнечной радиации

Солнце — гигантское светило, имеющее диаметр 1392 тыс. км. Его масса ($2 \cdot 10^{30}$ кг) в 333 тыс. раз превышает массу Земли, а объем в 1,3 млн. раз больше объема Земли. Химический состав Солнца: 81,76% водорода, 18,14% гелия и 0,1% азота. Средняя плотность вещества Солнца равна 1400 кг/м^3 , а в его центре она достигает 76000 кг/м^3 . Внутри Солнца происходят термоядерные, реакции превращения, водорода в гелий и каждую секунду 4

млрд. кг материи преобразуется в энергию, излучаемую Солнцем в космическое пространство в виде электромагнитных волн различной длины. Мощность потока солнечного излучения составляет $4 \cdot 10^{23}$ кВт. В центре Солнца давление достигает огромного значения в $2 \cdot 10^{10}$ МПа (около 204 млрд. атм.), а температура по разным оценкам составляет 8-40 млн. К, температура фотосферы на поверхности Солнца приблизительно равна 5900 К.

Солнечную энергию люди используют с древнейших времен. Еще в 212 г. до н.э. с помощью концентрированных солнечных лучей зажигали священный огонь у храмов. Согласно легенде приблизительно в то же время греческий ученый Архимед при защите родного города поджег паруса кораблей римского флота.

Солнечная радиация — это неисчерпаемый возобновляемый источник экологически чистой энергии. На Землю попадает незначительная доля излучаемой Солнцем энергии, причем 95 % поступающей солнечной энергии — это коротковолновое излучение в диапазоне длин волн от 0,3 до 2,4 мкм.

Верхней границы атмосферы Земли за год достигает поток солнечной энергии в количестве $5,6 \cdot 10^{24}$ Дж. Атмосфера Земли отражает 35 % этой энергии, т. е. $1,9 \cdot 10^{24}$ Дж, обратно в космос, а остальная энергия расходуется на нагрев земной поверхности (около $2,4 \cdot 10^{24}$ Дж), испарительно-осадочный цикл (около $1,3 \cdot 10^{24}$ Дж) и образование волн в морях и океанах, воздушных и океанских течений и ветра (около $1,2 \cdot 10^{22}$ Дж). Мощность потока солнечного излучения у верхней границы атмосферы Земли равна $1,78 \cdot 10^{17}$ Вт, а на поверхности Земли $1,2 \cdot 10^{17}$ Вт.

Плотность потока солнечной энергии I_0 у верхней границы атмосферы на поверхность, расположенную перпендикулярно направлению солнечных лучей, составляет 1353 Вт/м^2 и называется солнечной постоянной, а среднее количество энергии $E_{\text{он}}$, поступающей за один час на 1 м^2 этой поверхности, равно $4871 \text{ кДж/Дч} \cdot \text{м}^2$). Вследствие вращения Земли вокруг Солнца по эллиптической орбите расстояние между ними в течение года изменяется в пределах $150 \text{ млн. км} \pm 1,7\%$, а часовое количество внеатмосферной солнечной энергии, поступающей на 1 м^2 нормальной поверхности, изменяется в течение года менее чем на 7 % — от 4710 до 5036 кДж/(ч·м²).

Годовое количество поступающей на Землю солнечной энергии составляет $1,05 \cdot 10^{18}$ кВт·ч, причем на поверхность суши приходится только 1/5 часть этой энергии, т.е. $2 \cdot 10^{17}$ кВт·ч ($1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ кДж}$, а $1000 \text{ кДж} = 278 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$). К этому добавляются энергия ветра ($1,58 \cdot 10^{16}$ кВт·ч в год с мощностью $1,8 \cdot 10^{12}$ кВт) и другие косвенные виды солнечной энергии.

Без ущерба для экологической среды может быть использовано 1,5 % всей падающей на Землю солнечной энергии, т.е. $1,62 \cdot 10^{16}$ кВт·ч в год (что эквивалентно огромному количеству топлива — $2 \cdot 10^{12}$ т условного топлива), при этом мощность потока энергии составляет $1,85 \cdot 10^{12}$ кВт.

Распределение глобального потока солнечной радиации на поверхности земного шара крайне неравномерно. Количество солнечной энергии,

поступающей за год на 1 м^2 поверхности Земли, изменяется приблизительно от 3000 МДж/м^2 на севере до 8000 МДж/м^2 в наиболее жарких пустынных местах.

Среднегодовое количество солнечной энергии, поступающей за один день на 1 м^2 поверхности Земли, колеблется от $7,2 \text{ МДж/м}^2$ на севере до $21,4 \text{ МДж/м}^2$ в пустынях и тропиках. Пиковая плотность потока солнечной энергии достигает 1 кВт/м^2 .

Солнечное излучение у верхней границы земной атмосферы приблизительно соответствует излучению абсолютно черного тела с температурой 5900 К и включает ультрафиолетовое излучение (длина волн λ от $0,2$ до $0,4 \text{ мкм}$), видимый свет (λ от $0,4$ до $0,78 \text{ мкм}$) и инфракрасное излучение с более длинными волнами. Максимум интенсивности солнечного излучения приходится на длину волны $0,5 \text{ мкм}$.

При прохождении солнечных лучей через атмосферу Земли часть излучения рассеивается и поглощается молекулами озона, воздуха и водяного пара, а также частицами пыли — это приводит к ослаблению прямого солнечного излучения и появлению диффузного (рассеянного) излучения. Часть энергии, поглощенной и рассеянной газовыми частицами, возвращается обратно в космическое пространство, а основной ее поток достигает поверхности Земли в виде рассеянного (диффузного) излучения. Доля рассеянного (диффузного) излучения в общем потоке поступающей солнечной радиации зависит от географических и климатологических факторов и изменяется в течение года.

В весенне-летний период (с 21.03 до 22.09) поступление солнечной энергии на вертикальную поверхность в районе северного полюса максимальное, и с продвижением на юг оно уменьшается и на экваторе достигает - минимального значения — нуля — для поверхностей южной ориентации. В то же время в период с 22.09 до 21.03 поток солнечной радиации на вертикальную поверхность у северного полюса равен нулю, для поверхностей с восточной или западной ориентацией он максимален на экваторе и уменьшается при удалении от экватора, а зависимость поступления солнечной радиации на южные вертикальные поверхности от широты местности более сложная.

К солнечной энергии добавляются другие возобновляемые источники энергии, среди которых наибольшим потенциалом для практического использования обладает энергия ветра и биомассы. Годовая продукция фотосинтеза, в результате которого образуется биомасса, составляет $57 \cdot 10^{12} \text{ кг}$ углерода, при этом накопленная энергия биомассы в десятки раз превосходит годовую потребность человечества в энергии [3].

1.2 Определение солнечного потенциала Казахстана

Казахстан, несмотря на то, что является одним из мировых лидеров по запасам топливных ресурсов, тоже активно начинает использовать «нетрадиционные» источники энергии. В современных условиях они должны

обеспечить переток капиталов в пользу развития не сырьевого сектора экономики и в особенности высокотехнологичных и наукоемких производств. Это подчеркивается в Законе Республики Казахстан от 25 декабря 1997 г. N 210-1 "Об энергосбережении" [4] и "Стратегии индустриально-инновационного развития страны на 2003-2015 гг."

Большое внимание вопросу расширения использования в Казахстане возобновляемых источников энергии уделяет глава нашего государства Н.А.Назарбаев. На прошедшем 19-ом пленарном заседании Совета иностранных инвесторов при президенте РК с участием Нурсултана Назарбаева обсуждали вопросы обеспечения благоприятного инвестиционного климата в энергетической отрасли страны и реализацию инновационных проектов в этой сфере. Президент поручил оказать государственную поддержку предприятиям, реализующим программы по энергосбережению. Он отметил, что в республике «необходимо активизировать пропаганду экономии энергии среди бытовых и промышленных потребителей», что является единственной возможностью решить проблему энергодефицита в кратко- и среднесрочной перспективах. «Доля возобновляемых источников в общем топливно-энергетическом балансе страны сейчас составляет всего 0,02 процента. Это не может нас устраивать, если учесть имеющийся огромный потенциал по таким ресурсам, как ветровая, солнечная энергия и т.п.», - сказал президент [5].

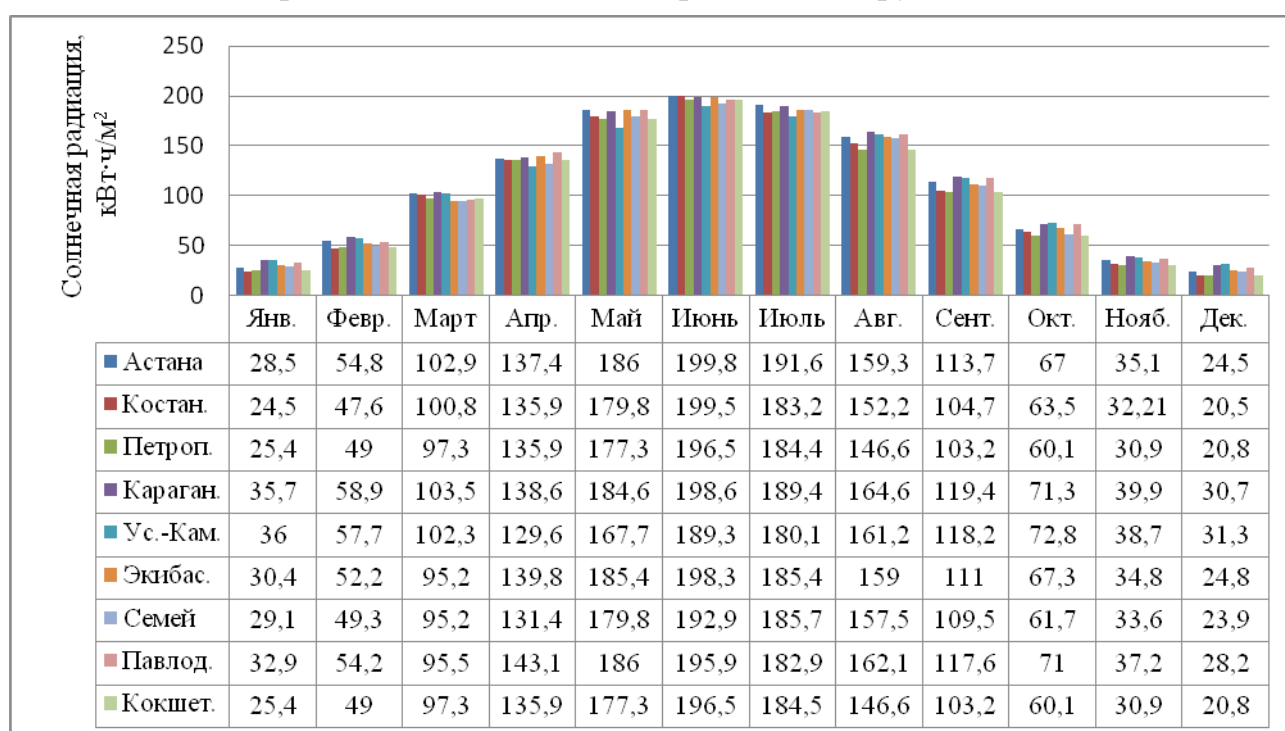
По данным Министерства энергетики и минеральных ресурсов РК, в первом квартале 2008 года объемы потребления электроэнергии превысили объемы ее производства. В связи с этим в 2007 году принят план мероприятий по развитию электроэнергетической отрасли Казахстана до 2015 года. План предусматривает развитие в стране электросетевых объектов, в частности, реконструкцию 23 объектов энергоснабжения и строительство 22 новых электростанций. Первоочередными задачами стало строительство Балхашской ТЭС, Мойнакской ГЭС, третьего энергоблока. Республика Казахстан обладает большими потенциальными возможностями освоения нетрадиционных источников энергии, которые при продуманной государственной политике, направленной на стимулирование освоения данных источников энергии, могут покрыть практически весь дальнейший прирост производства электрической энергии в нашей стране. В докладе, опубликованном экологической организацией Гринпис и Европейской ассоциацией фотоэлектрической промышленности (EPIA) в Испании, еще раз утверждается, что две трети населения Земли сможет к 2030 году полностью обеспечивать свои нужды в электроэнергии благодаря энергии Солнца.

Новая энергетическая политика, нацеленная на достижение конкурентоспособности, устойчивого развития и надежности энергоснабжения, предусматривает, что доля возобновляемых источников энергии в общих энергоресурсах составит 20%, а биологического топлива - 10%. Реализации поставленных задач способствует географическое расположение страны [6].

Многолетние статистические данные об основных составляющих солнечного излучения по территории северных регионов Казахстана, а именно продолжительности солнечного излучения и количестве солнечных дней дает возможность оценки перспективного использования солнечных энергетических установок (СЭУ), однако эти данные требуют анализа для выявления особенностей данного региона [7].

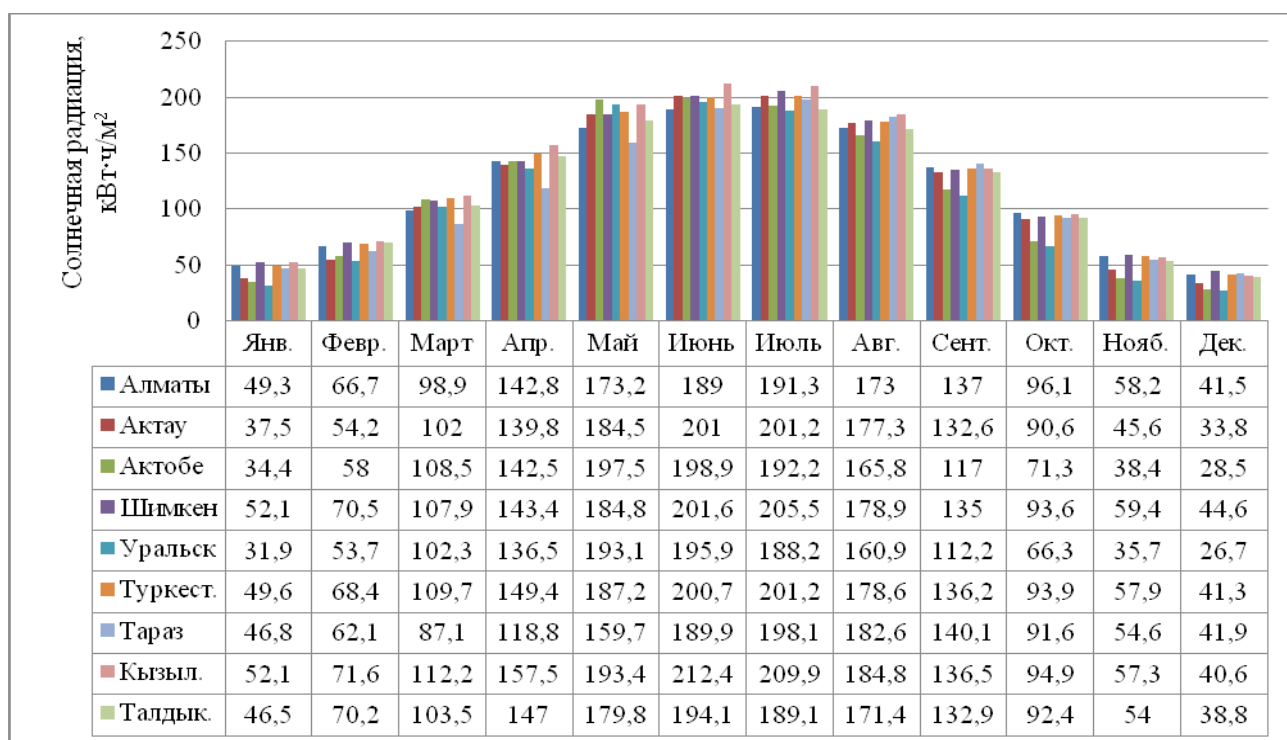
Для получения количества солнечной радиации в северном регионе Казахстана было проведено исследование на примере восемнадцати городов. Расчет проводился по усредненным значениям за период в десять лет, при помощи программы-симулятора фотопреобразовательных систем PVSYST Version 4.33 [8]. Полученные результаты занесены в таблицу 1, 2. На основании этих данных можно определить солнечный потенциал.

Таблица 1 – Распределение солнечной энергии по северу Казахстана



Из таблицы 1 видно, что наибольший потенциал солнечной радиации наблюдается в весенне-летний период, а максимальное значение в этот период достигает 200 кВт·ч/м².

Таблица 2 – Распределение солнечной энергии по югу Казахстана



Аналогично, что пик солнечной энергии пришелся на весенне-летний период времени. Максимальное значение солнечной энергии составляет 212 кВт·ч/м².

Для эффективного использования энергии Солнца, необходимо также знать суммарную годовую энергию, полученную от нашего светила, для выбранной территории, а в частности для «северной» и для «южной» частей Казахстана, представленной в таблице 3, 4.

Таблица 3 – Среднегодовое значение солнечной радиации северного Казахстана

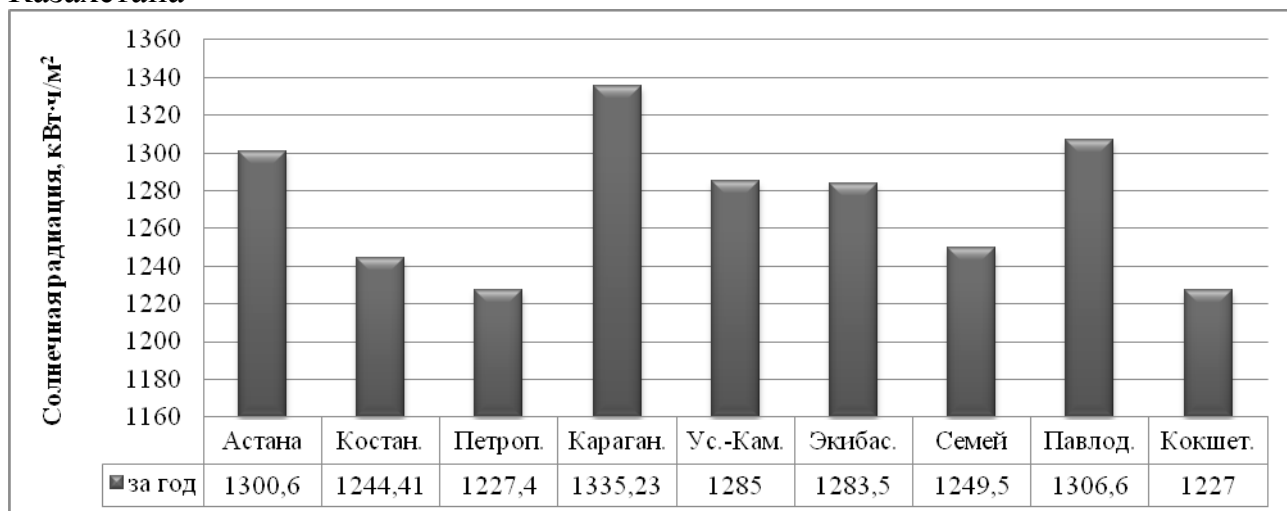
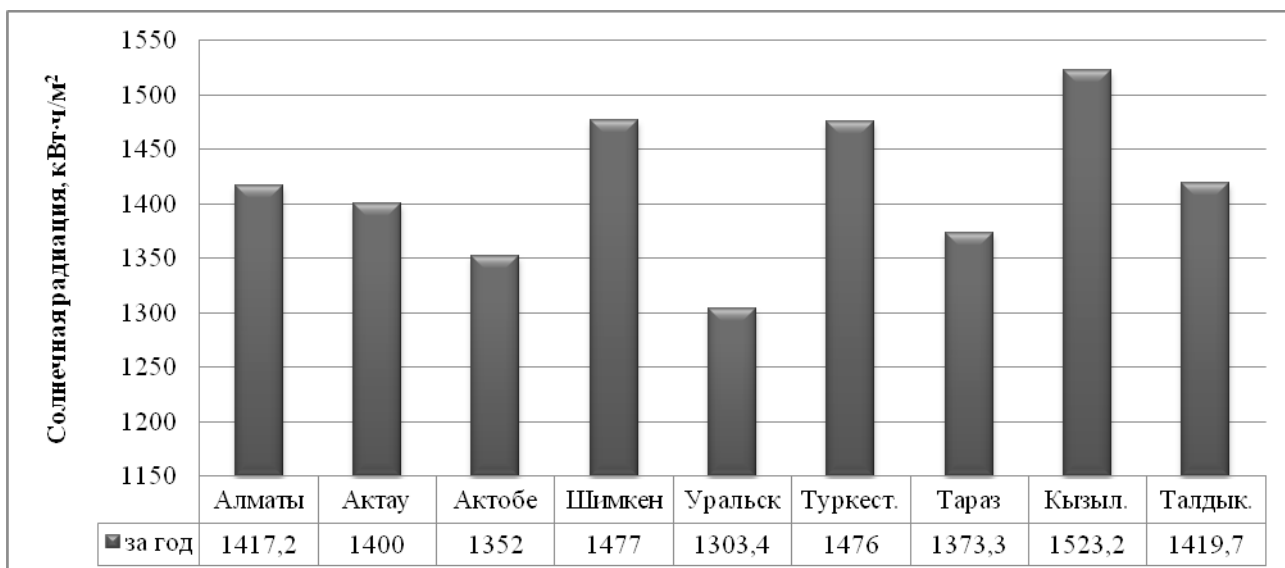


Таблица 4 – Среднегодовое значение солнечной радиации южного Казахстана



Среднегодовое значение солнечной радиации «южной» части Казахстана значительно больше, чем в «северной» части, это объясняется их географическим положением. Количество солнечной энергии, достигающей поверхности Земли, отличается от среднегодового значения: в зимнее время - менее чем на 0,8 кВт·ч/м² в день на Севере Европы и более чем на 4 кВт·ч/м² в день в летнее время в этом же регионе. Различие уменьшается по мере приближения к экватору [2].

1.3 Возможности использования фотоэлектрических преобразователей в г. Павлодар

Ограниченность запасов органического топлива обуславливает необходимость поиска новых возобновляемых источников энергии, среди которых по масштабам ресурсов и повсеместной распространенности наиболее перспективна солнечная радиация.

Препятствиями широкому распространению фотоэлектрических преобразователей являются низкая информированность и отсутствие у заказчиков экономических оценок реализации проекта. С целью получения данных для расчета экономических показателей эффективности использования солнечной радиации для выработки электрической энергии был произведен анализ результатов температуры наружного воздуха, поступления солнечной радиации и скорости ветра за 2008-2009 годы, полученных в лаборатории «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» Инновационного Евразийского университета г. Павлодара (см. рис. 4).

Geographic site parameters

Geographical Coordinates Monthly Meteo

Site : **Kazakhstan (Kazakhstan)**

Data source : Лаборатория "Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии" ИНЕУ г. Павлодар

	Global irradi. kWh/ml	Diffuse kWh/ml	Temper. °C	Wind vel. 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
Year	1221.4		5.6	4.6

Required data

☒ Horizontal global irradiation

☒ Average ext. temperature

Extra data (if available)

☐ Horizontal diffuse irradiation

☒ Wind velocity

Irradiation units

☐ kWh / m2 day

☒ kWh / m2 month

☐ MJ / m2 day

☐ MJ / m2 month

☐ W / m2

☐ Clearness Index Kt

Default (from NASA-SSE)

Paste

Paste

Paste

Cancel

OK

Рисунок 4 - Метеоданные по г. Павлодару за 2008-2009 годы

Обработка полученных параметров метеоданных произведена с применением специализированной программы-симулятора фотопреобразовательных систем PVSYST Version 4.33 [8]. Оборудование и программное обеспечение, использованные для получения и обработки данных, были предоставлены по программе международного образовательного консорциума по возобновляемой энергетике, финансируемого Tempus Tacis (2006-2009). Результаты обработки представлены в виде графиков зависимости количества солнечной радиации от времени светового дня на рисунке 5.

С помощью данного графика можно определить продолжительность солнечного дня, а также пиковое значение солнечного излучения. Например, 21 апреля 2009 г. начало солнечной активности (восход Солнца) зарегистрировано в 5.50 утра, а закончилась в 20:00 вечера, т. е. солнечный день длился 14 часов 10 минут. При этом максимум солнечной активности пришелся на 13.00 часов дня и составил 780 Вт/м².

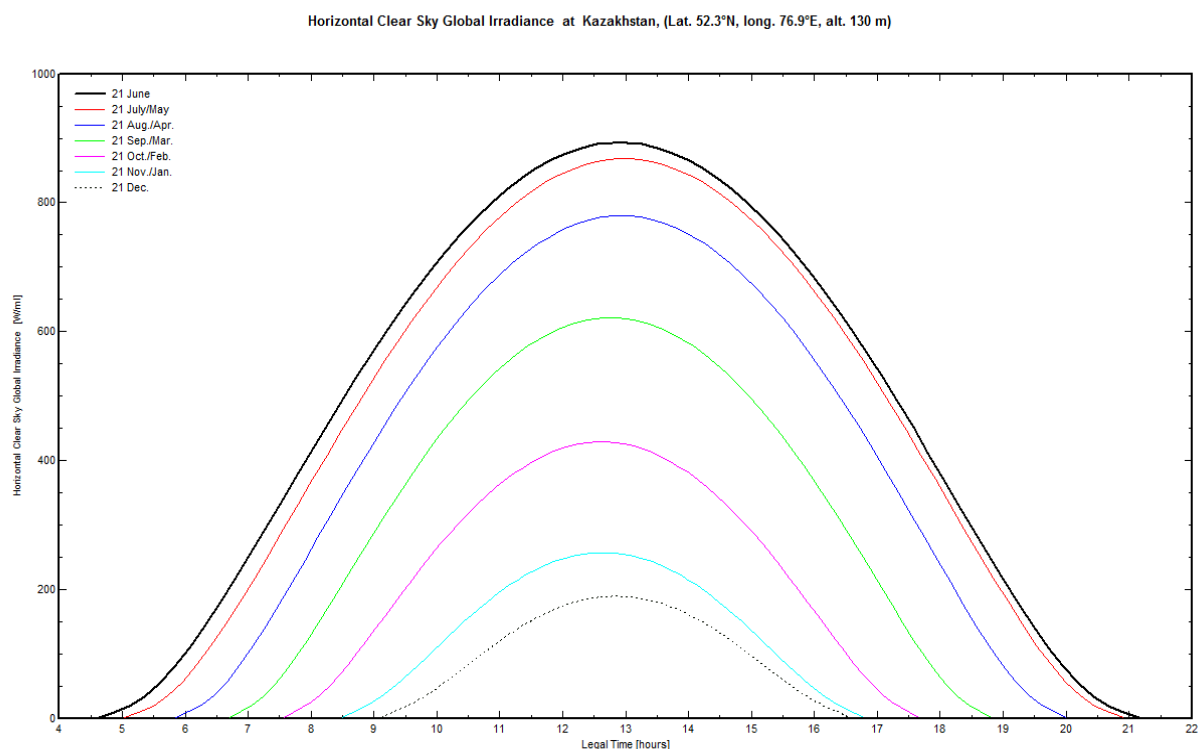


Рисунок 5 – Графики зависимости количества солнечной радиации от времени светового дня

Основываясь на том, что в Павлодаре энергия солнечного сияния составляет 1221,4 кВт·ч на квадратный метр в год, а на Земле в среднем около 1000 киловатт на квадратный метр, можно с уверенностью сказать, использование энергии Солнца очень перспективно [9].

Clear Day Global Tilted Irradiances for Pavlodar								
Close Print Export Help								
Clear sky model at Pavlodar, (Lat. 50.3°N, long. 76.9°E, alt. 160 m)								
kWh/ml	Global	Extraterr.	Tilt=45°	Tilt=45°	Tilt=45°	Tilt=45°	Tilt=45°	Tilt=45°
Legal Time	Horiz.	Horiz.	Azim=0°	Azim=90°	Azim=180°	Azim=270°	Azim=360°	Azim=450°
01/04/09 12h00	5.296	7.691	7.262	4.699	0.705	4.699	7.258	4.699
01/05/09 12h00	7.021	9.930	7.626	6.067	2.856	6.067	7.653	6.067
31/05/09 12h00	8.088	11.348	7.664	6.868	4.543	6.868	7.670	6.868
30/06/09 12h00	8.248	11.559	7.633	6.982	4.841	6.982	7.631	6.982
30/07/09 12h00	7.523	10.576	7.620	6.444	3.666	6.444	7.646	6.444
29/08/09 12h00	6.030	8.614	7.440	5.287	1.580	5.287	7.438	5.287
28/09/09 12h00	4.149	6.194	6.619	3.743	0.489	3.743	6.614	3.743
28/10/09 12h00	2.405	3.931	5.061	2.230	0.378	2.230	5.056	2.230
27/11/09 12h00	1.311	2.433	3.479	1.239	0.284	1.238	3.475	1.239
27/12/09 12h00	1.037	2.035	2.961	0.986	0.254	0.986	2.959	0.986
26/01/10 12h00	1.660	2.933	4.066	1.559	0.317	1.559	4.062	1.559
25/02/10 12h00	3.071	4.822	5.791	2.818	0.423	2.818	5.785	2.818
27/03/10 12h00	4.958	7.257	7.114	4.421	0.559	4.421	7.110	4.421
26/04/10 12h00	6.755	9.580	7.611	5.862	2.478	5.862	7.611	5.862

Рисунок 6 – Зависимость солнечной радиации от азимута

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 впрок в аккумуляторах. Количество солнечной радиации, принимаемой солнечной панелью, во многом зависит от ориентации ее в пространстве. Программа PVSYST позволяет найти оптимальный угол наклона солнечной панели к горизонту β и оптимальный азимут поверхности a_n в любое время года и суток. Выявлено, в Павлодаре при установке солнечной панели с фиксированным наклоном на протяжении года, оптимальный угол $\beta = 47,5^\circ$ $a_n = 0$. Хотя, безусловно, вне конкуренции находятся панели, следящие за Солнцем [10]. Преимущества этих систем рассмотрены на рисунке 7.

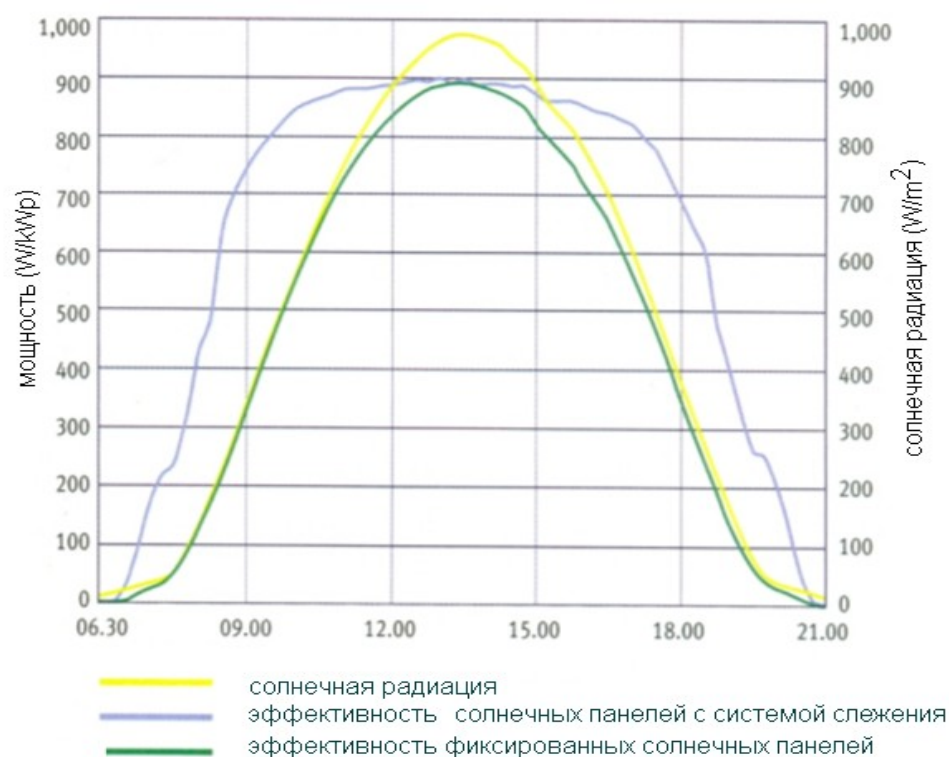


Рисунок 7 – Преимущества следящих за Солнцем систем

Использование программы PVSYST в исследовательской работе лаборатории «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» ИнЕУ будет продолжено. Она обладает большим набором баз данных: метеоданные с различных метеостанций и спутников; база данных составных и вспомогательных компонентов солнечных панелей; база данных различных потребителей электроэнергии. Вместе с тем, она позволяет создавать и использовать свои базы данных. Итогом работы в программе является получение технических результатов: полезная энергия, используемая энергия, КПД и экономических характеристик: капиталовложения, чистые инвестиции, годовой взнос в счет амортизации, сумма выплат по кредиту, стоимость выработанной энергии.

Очевидно, что потребитель “солнечных” технологий может смоделировать с помощью PVSYST оптимальный вариант извлечения энергии из солнечных лучей [11].

1.4 Распределение солнечной активности по географическим широтам

В зоне умеренного пояса (Павлодар $52^{\circ}18'56''$ с. ш. $76^{\circ}57'23''$ в. д.) солнце в среднем светит только 6-7 часов в день, в тропиках — 7-8 часов. Если мы будем двигаться от умеренных зон дальше на север или юг, то дни начнут становиться длиннее, но только летом, а зимой наоборот короче, но в то же время и интенсивность солнечных лучей тоже уменьшится, потому что им придется проходить большую дистанцию через рассеивающую атмосферу. Например, в приполярных регионах день длится 6 месяцев, но солнечный свет там значительно слабее, чем на экваторе [12].

Количество солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность, сильно зависит от широты местности. Характер отражен на рисунке 8 [8].

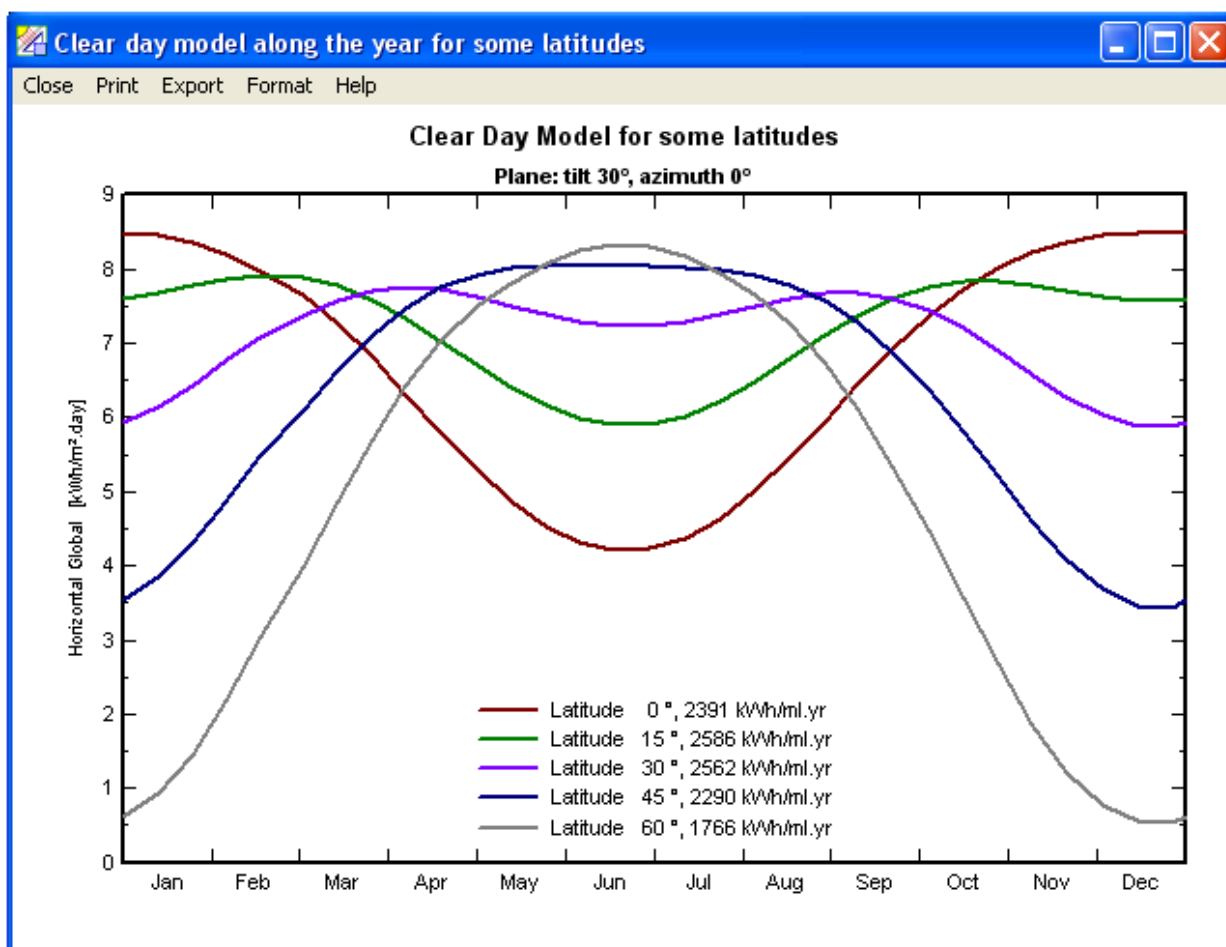


Рисунок 8 — Зависимость количества солнечной энергии от широты местности

Для расчета располагаемого количества солнечной энергии, поступающего на наклонную лучепоглощающую поверхность, необходимо знать углы падения солнечных лучей на наклонную и горизонтальную поверхности в данном месте. Положение некоторой точки А на земной поверхности относительно солнечных лучей в данный момент времени определяется тремя основными углами - широтой местоположения точки φ , часовым углом ω и склонением Солнца δ (см. рисунок 9). Широта φ - это угол между линией, соединяющей точку А с центром Земли О, и ее проекцией на плоскость экватора. Часовой угол ω - это угол, измеренный в экваториальной плоскости между проекцией линии ОА и проекцией линии, соединяющей центры Земли и Солнца. Угол $\varphi=0$ в солнечный полдень, а 1 ч соответствует 15° . Склонение Солнца δ - это угол между линией, соединяющей центры Земли и Солнца, и ее проекцией на плоскость экватора. Склонение Солнца δ в течение года непрерывно изменяется - от $-23^\circ 27'$ в день зимнего солнцестояния 22 декабря до $+23^\circ 27'$ в день летнего солнцестояния 22 июня и равно нулю в дни весеннего и осеннего равноденствия (21 марта и 23 сентября).

Склонение Солнца в данный день определяется по формуле

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (1)$$

где n – порядковый номер дня, отсчитанный от января

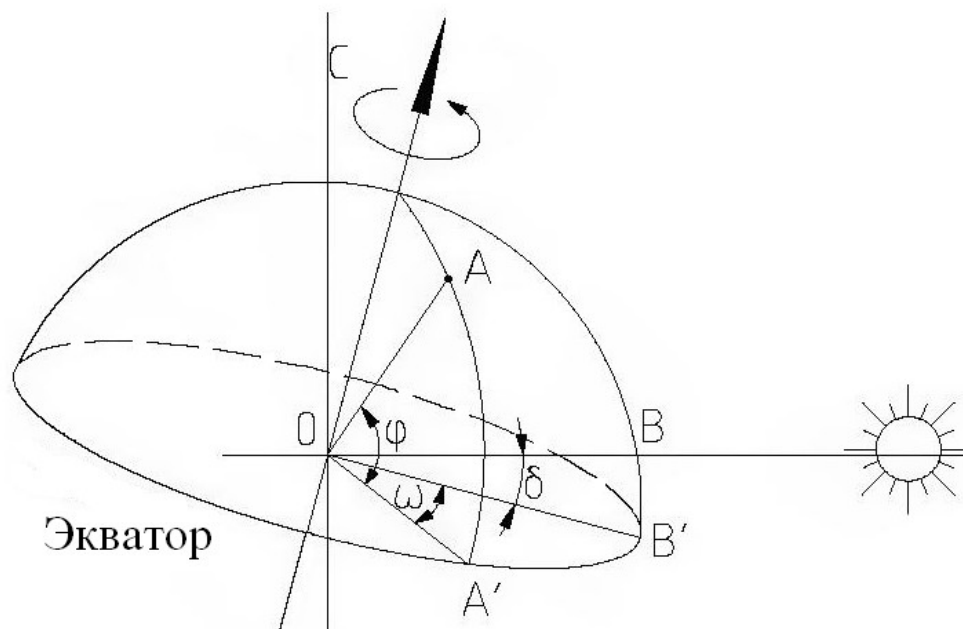


Рисунок 9 - Схема кажущегося движения Солнца по небосводу

Наряду с тремя основными углами φ , ω и δ в расчетах солнечной радиации используют также зенитный угол z , угол высоты α и азимут a Солнца.

Зенитный угол Солнца z - это угол между солнечным лучом и нормалью к горизонтальной плоскости в точке А. Угол высоты Солнца α - это угол в вертикальной плоскости между солнечным лучом и его проекцией на горизонтальную плоскость. Сумма $\alpha + z$ равна 90° . Азимут Солнца a - это угол в горизонтальной плоскости между проекцией солнечного луча и направлением на юг (см. рисунок 10). Азимут поверхности a_n измеряется как угол между нормалью к поверхности и направлением на юг.

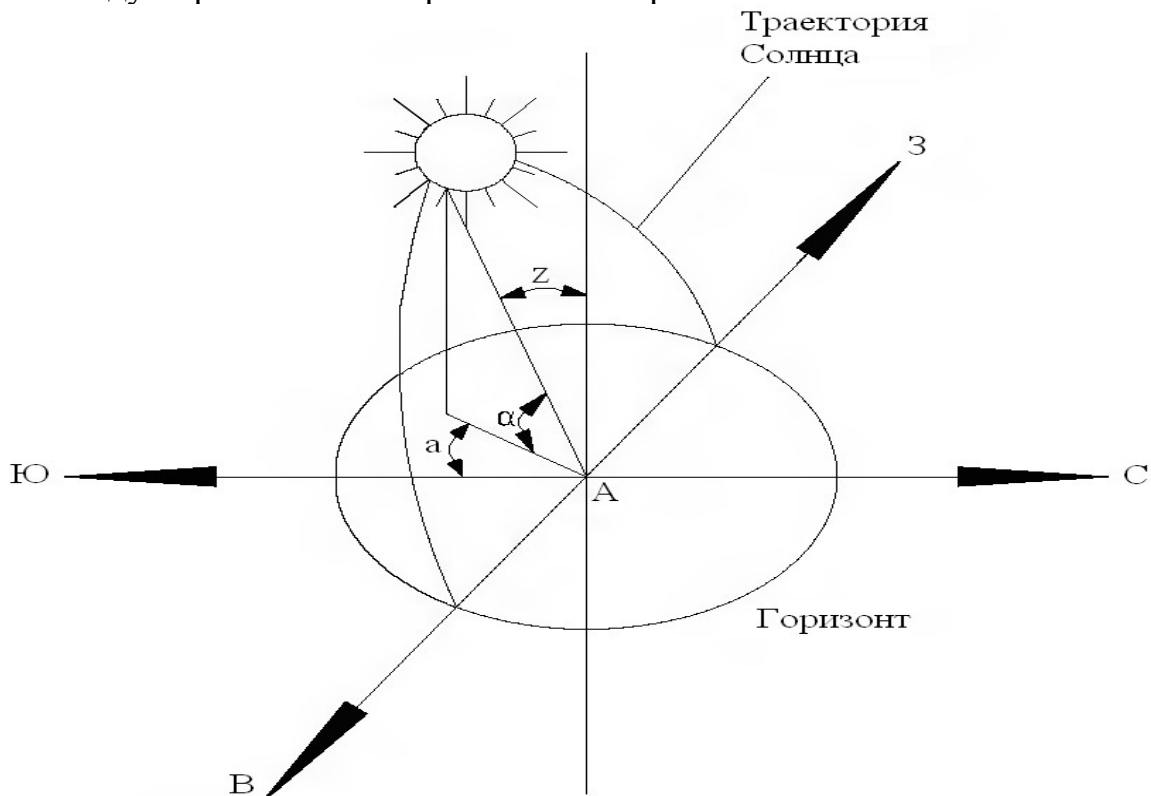


Рисунок 10 – Углы, определяющие положение точки А на земной поверхности относительно солнечных лучей

Связь между дополнительными и основными углами устанавливается следующими уравнениями:

- зенитный угол $\cos z = \cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta$;

- угол высоты Солнца $\alpha = 90 - z$, поэтому $\sin \alpha = \cos z$;

- азимут Солнца $\sin a = \sec \alpha \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega$.

В солнечный полдень ($\omega=0$) $a = 0$ при $\varphi > \delta$ и $a = \pi$ при $\varphi < \delta$.

Максимальный угол высоты Солнца достигается в солнечный полдень при $\omega = 0$, т.е. $\alpha_{\text{макс}} = \frac{\pi}{2} - |\varphi - \delta|$.

При пользовании приведенными формулами для северного полушария широта φ берется со знаком «+», а для южного - со знаком «-», склонение

Солнца δ имеет знак «+» для лета (от весеннего до осеннего равноденствия) и знак «-» в остальное время года. Угол ω изменяется от 0 в солнечный полдень до 180° в полночь, при $\omega < 90^\circ$ он имеет знак «+», а при $\omega > 90^\circ$ - знак «-». Азимут Солнца a_n изменяется от 0 до 180° .

Угол падения солнечных лучей на произвольно ориентированную поверхность, имеющую азимут a_n и угол наклона к горизонту β , определяется по формуле

$$\cos i = \sin \beta \cdot [\cos \delta \cdot (\sin \varphi \cdot \cos a_n \cdot \cos \omega + \sin a_n \cdot \sin \omega - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos a_n)] + \cos \beta \cdot [\cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi] \quad (2)$$

где φ – широта;

δ – склонение Солнца;

ω – часовой угол Солнца.

Угол падения лучей на горизонтальную поверхность ($\beta=0^\circ$)

$$\cos i = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

Угол падения лучей на вертикальную поверхность ($\beta=90^\circ$)

$$\cos i = \cos \delta \cdot (\sin \varphi \cdot \cos a_n \cdot \cos \omega + \sin a_n \cdot \sin \omega) - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos a_n \quad (4)$$

Азимут вертикальной поверхности a_n в том случае, если она ориентирована на юг, равен 0° , на запад 90° , на восток -90° , на север 180° . Подставляя эти значения a_n в последнюю формулу, получаем выражения для угла падения лучей на вертикальную поверхность данной ориентации

Для наклонной поверхности с южной ориентацией ($a_n=0^\circ$) имеем

$$\cos i = \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta + \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (5)$$

Для обеспечения улавливания максимального количества (за расчетный период) солнечной энергии солнечный модуль обычно устанавливают в наклонном положении с оптимальным углом наклона к горизонту.

Среднемесячное дневное суммарное количество солнечной энергии, поступающую на наклонную поверхность солнечного модуля, определяется по формуле

$$E_k = R \cdot E, \quad (6)$$

где E - среднемесячное дневное суммарное количество солнечной энергии, поступающей на горизонтальную поверхность, МДж/(м²-дни);

R - отношение среднемесячных дневных количеств солнечной радиации, поступающей на наклонную и горизонтальную поверхности.

Коэффициент пересчета количества солнечной энергии с горизонтальной поверхности на наклонную поверхность солнечного модуля с южной ориентацией равен сумме трех составляющих, соответствующих прямому, рассеянному и отраженному солнечному излучению:

$$R = \left(1 - \frac{E_p}{E}\right) \cdot R_n + \frac{E_p}{E} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (7)$$

где E_p - среднемесячное дневное количество рассеянного солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность, МДж/(м²·дни);

E_p/E - среднемесячная дневная доля рассеянного солнечного излучения;

R_n - среднемесячный коэффициент пересчета прямого солнечного излучения с горизонтальной на наклонную поверхность;

β - угол наклона поверхности солнечного модуля к горизонту;

ρ - коэффициент отражения (альбедо) поверхности Земли и окружающих тел, обычно принимаемый равным 0,7 для зимы и 0,2 для лета.

Среднемесячный коэффициент пересчета прямого солнечного излучения для поверхности солнечного модуля с южной ориентацией имеет вид

$$R_n = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_{\text{зн}} + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_{\text{зн}} \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_3 + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_3 \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta}, \quad (8)$$

где φ - широта местности, град;

β - угол наклона солнечной батареи к горизонту, град;

δ - склонение Солнца в средний день месяца, град.

Часовой угол захода (восхода) Солнца для горизонтальной поверхности

$$\omega_3 = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta). \quad (9)$$

В качестве часового угла захода Солнца для наклонной поверхности с южной ориентацией принимают меньшую из двух величин: ω_3 или величину $\omega_{\text{зн}}$, рассчитанную по формуле [13]

$$\omega_{\text{эН}} = \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \cdot \operatorname{tg}\delta] \quad (10)$$

1.5 Потенциал природных ресурсов Казахстана

У Казахстана есть все необходимое для развития солнечной энергетики. Более того, у Казахстана, в недрах которого находится вся таблица Менделеева, а территория - в "солнечном поясе", есть шанс выбиться по этому показателю в мировые лидеры.

В послании народу президент страны Нурсултан Назарбаев поставил задачу создать инновационные и передовые производства в республике. Одним из таких направлений может стать развитие солнечной энергетики.

Солнечная энергетика вслед за ядерной энергией в настоящий момент переживает ренессанс. Такое положение связано с ужесточением экологических норм и ростом потребности в электроэнергии. Это «ножницы» мировой экономики, поскольку трудно нарастить энергетические мощности без ущерба для окружающей среды. Но выход есть – ускоренный переход к более «чистой» энергетике. Так, развитые страны объявили о предпринимаемых мерах по значительному, поэтапному снижению техногенных выбросов (от 15 до 40%) и выделяемых средствах порядка 30 млрд. долларов США в течение ближайших трех лет и 100 млрд. до 2020 года для помощи наименее обеспеченным странам, страдающим от потепления климата. Эти страны также просят оказать им помощь как в технологическом и техническом оснащении тепловых электростанций, обеспечивших промышленно развитым странам технический прогресс в XX веке, так и в использовании новых источников энергии. Учитывая важность проблемы, было принято решение рассмотреть исполнение юридических обязательств государств по Киотскому протоколу на конференции ООН по климату в этом году в Мехико [14].

Однако будущее, несомненно, принадлежит возобновляемой солнечной энергетике. 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. В программных документах и посланиях президент нашей страны Нурсултан Абишевич Назарбаев также указывает на необходимость расширенного использования возобновляемых источников энергии.

Солнечная энергетика основана главным образом на двух формах использования солнечной энергии. Одной из форм являются солнечные тепловые системы, которые вырабатывают низкопотенциальное тепло, т. е.

вода в специальных установках разогревается солнечным излучением и используется для коммунально-бытового горячего водоснабжения и теплоснабжения. Преобладающим видом оборудования здесь являются так называемые плоские солнечные коллекторы. Их общемировое производство, по различным оценкам, составляет более 2 млн. м² в год, а выработка тепла достигает 107 миллиардов калорий. Это направление требует отдельного рассмотрения, т. к. широкое использование таких тепловых систем в южных регионах нашей страны является крайне важным, и необходима специальная программа для развития этого сектора энергетики.

Однако основной и наиболее перспективной формой использования солнечной энергии являются фотоэлектрические системы прямого преобразования солнечного излучения в электрическую энергию. Эти системы не содержат каких-либо движущихся механических узлов и не основаны на тепловых процессах, что сказывается на их надежности и долговечности. Другие преимущества солнечных батарей – это экономичность, бесшумность, экологическая чистота и способность работать в условиях рассеянного света при облачности и даже при дожде. Этот вид солнечной энергии получил название фотоэнергетика (ФЭ). Современный мировой рынок ФЭ – это быстроразвивающаяся отрасль мировой экономики с возрастающим темпом роста. Объем производства солнечных фотоэлектрических систем с 2000 по 2004 год увеличивался в среднем на 30 процентов в год, в предкризисные 2005–2007 годы превышал 50 процентов, а в наиболее трудный 2009 год составил 11 процентов.

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, один млн. солнечных крыш в США и, во-вторых, государственной поддержкой. Например, в ЕС на развитие фотоэнергетики до 2010 г. выделено три млрд. евро, а в США 6,3 млрд. долларов. 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 [15].

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. Важным является и такой социальный аспект, как создание рабочих мест индустрией ФЭ, число которых должно составить к 2020 году в ЕС 200000, а в мире более 2000000. 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.

Элементной базой ФЭ являются полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), конвертирующие солнечную энергию в электрическую. В настоящее время около 90 процентов ФЭП изготавливается на основе пластин поли- и монокристаллического кремния, а оставшуюся часть составляют тонкопленочные ФЭП на основе аморфного кремния (5 – 6%) и полупроводниковых соединений (4–5%). Средний уровень КПД кремниевых фотоэлементов постоянно увеличивается.

По степени распространенности в земной коре кремний занимает второе место после кислорода, составляя почти 30 процентов по весу, что является важным при планировании больших объемов ФЭ. В настоящее время проводятся широкомасштабные разработки технологий, снижающих стоимость «солнечного» кремния, который вследствие более низких требований по содержанию примесей должен быть значительно дешевле «электронного» кремния, т.е. кремния, используемого для изготовления полупроводниковых электронных приборов. Например, если еще несколько лет назад основным материалом для ФЭ были отходы производимого полупроводниковой промышленностью электронного кремния, то уже в 2008–2009 гг. были введены в строй заводы, ориентированные на выпуск «солнечного» кремния (см. рис. 11) .

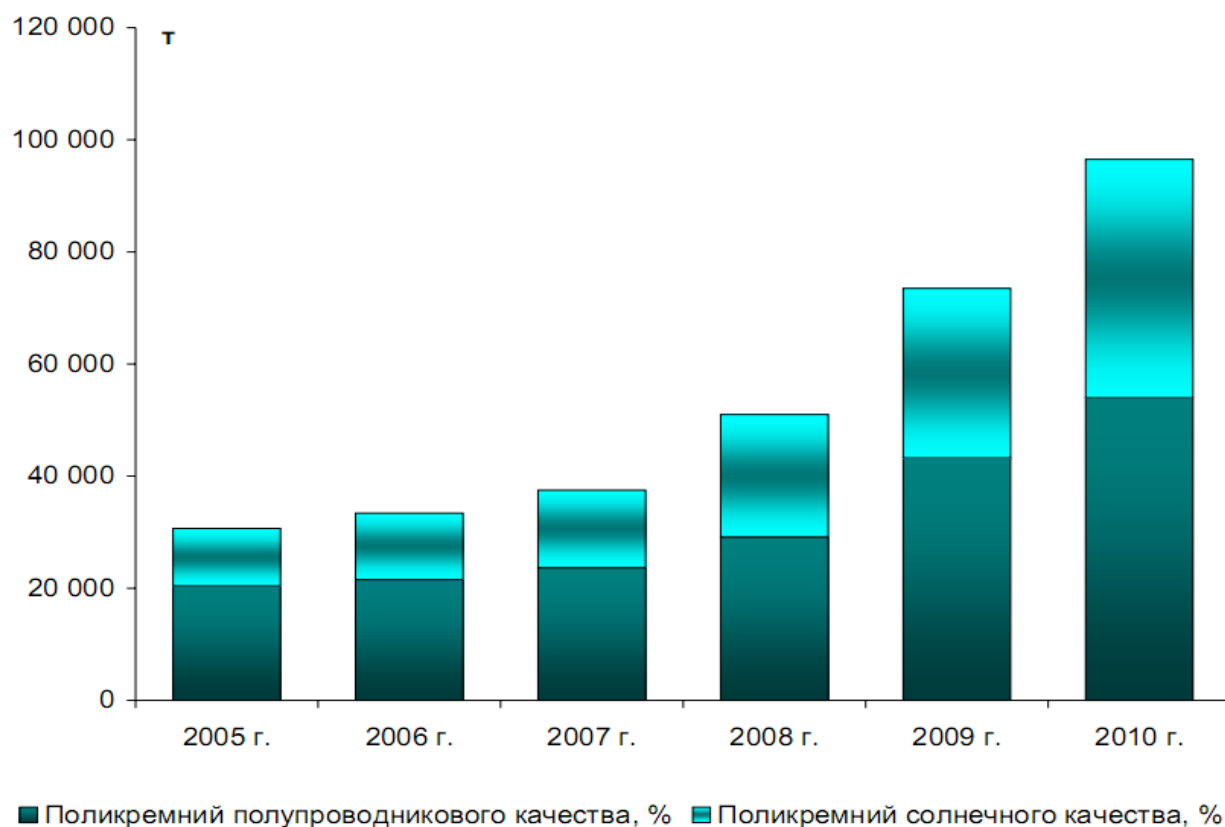


Рисунок 11 – Динамика мирового производства поликремния, т, % [16]

Его производство в настоящее время (90–100 тысяч тонн в год) более чем в 2,5 раза превышает производство «электронного» кремния. Для этого уже освоено производство «солнечного» металлургического кремния, на котором изготовлены ФЭП с КПД 16,4 процента, что позволит снизить к 2012 г. почти в три раза стоимость вырабатываемой электроэнергии (до одного евро за ватт) в основном только за счет снижения стоимости исходного материала и существенно сократить срок возврата вложенных средств. Дальнейшее снижение стоимости до 0,6–0,75 евро к 2020-му и 0,3–0,4 евро к 2030 г. будет происходить за счет уменьшения толщины пластин с 250 до 100 микрон и совершенствования технологии тонкопленочных кремниевых ФЭП. Необходимо отметить, что для осаждения тонких пленок также необходимы кремниевые подложки. Поэтому потребность в кремнии будет возрастать с увеличением производства запланированных мощностей ФЭ, а Казахстан богат сырьевыми ресурсами для производства этого материала.

Основой для производства стали, алюминиевых сплавов и полупроводникового («солнечного» и «электронного») кремния является металлургический кремний (МК). Мировое производство МК составляет более одного миллиона тонн, и расходы этого материала для получения полупроводникового кремния возросли за последнее десятилетие с 5 до 10 процентов.

Этот материал путем обработки в соляной кислоте переводится в ряд хлорсилановых газов, из которых получают около 90 процентов полупроводникового кремния для электронной техники и ФЭ, оставшиеся 10

процентов «солнечного» кремния получают методом прямой очистки МК (см. рис. 12) [17].

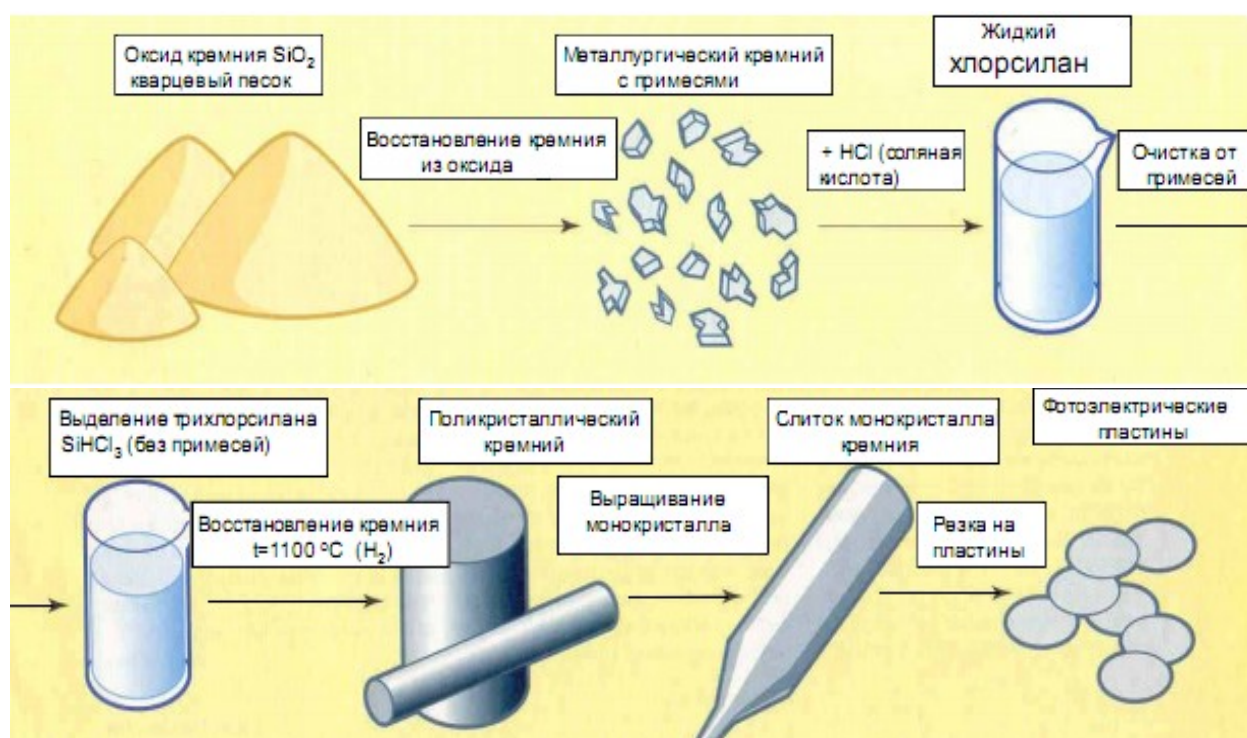


Рисунок 12 – Технология изготовления фотоэлектрических пластин

В настоящее время основным поставщиком этого материала на рынок по цене 750–900 тенге/кг является Норвегия. Сырьем для получения МК является кварц или кварциты, представляющие собой двуокись кремния (SiO_2) и углерод (древесный уголь, сажа, кокс). Казахстан обладает громадными запасами двуокиси кремния, так недра страны содержат 265 млн. тонн кварцитов и 65 млн. тонн высокочистого кварца. Ряд компаний – Silicium Kazakhstan, Kun Renewables и др. заявили о разработке проектов по производству МК, поликристаллического кремния, а в дальнейшем ФЭП, модулей и фотоэнергетических установок в различных областях Казахстана.



Рисунок 13 – «Силиконовый кластер» на территории России и Казахстана



Рисунок 14 – Завершение строительства завода по производству металлургического кремния в Казахстане [18]

Для нашей страны достаточно строительства одного комплексного завода с детальной проработкой технического задания на его проектирование, включая решение вопросов инфраструктуры и энергообеспечения. Задание должно включать организацию следующих производств: обогащенного кварца и высокочистых углеродных стержней, металлургического кремния чистотой 98,5–99,5 процента, а также исходных газов для хлорсиланового производства поликристаллического «солнечного» кремния и ФЭП. В принципе, продукция каждого из вышеперечисленных производств должна быть ориентирована на экспорт. Также представляется целесообразным

включение отдельного задания на производство «солнечного» кремния металлургическим путем, исключая хлорсилановые переделы [19].

1.6 Выводы

Солнечная энергетика признана одним из наиболее перспективных видов альтернативной энергетики в мире. Из всех альтернативных источников энергия солнца является самой чистой и безопасной.

Несмотря на то, что Казахстан расположен на широтах между 42 и 55 градусами к северу, потенциал солнечной радиации на территории республики достаточно значителен и составляет 1300-1800 кВт·ч/м²·год. В связи с континентальным климатом, количество солнечных часов в году составляет 2200-3000. Наличие значительного потенциала солнечной энергии делает возможным его экономическое использование. В Казахстане есть все условия для развития солнечной энергетики. Есть промышленные запасы кварцевого сырья и других минералов, в том числе редкоземельных, необходимых для производства фотоэлементов - галлия, мышьяка, кадмия, германия.

Предложенное главой государства в послании-2010 создание при Новом университете в Астане трех научных центров, в том числе по возобновляемой энергетике, позволит разрабатывать перспективные технологии производства ФЭП новых генераций и производить их внедрение на научно-производственной базе этого комплексного предприятия. Разработка и реализация подобных проектов может производиться также и в организованных при национальных и областных университетах инженерных лабораториях.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

2.1 Интенсивность солнечного излучения

Источником энергии солнечного излучения служит термоядерная реакция на Солнце. Основная часть этой энергии испускается в виде электромагнитного излучения в диапазоне длин волн $\lambda = 0,2 - 3$ мкм. При прохождении через атмосферу солнечный свет ослабляется, в основном за счет поглощения инфракрасного излучения парами воды, ультрафиолетового излучения - озоном и рассеяния излучения молекулами газов и находящимися в воздухе час-

тицами пыли и аэрозолями. Параметром, отражающим влияние атмосферы на интенсивность и спектральный состав солнечного излучения, достигающего до земной поверхности, является **атмосферная** (или воздушная) **масса** (АМ). При нулевой воздушной массе АМ0 у верхней границы атмосферы интенсивность излучения равна $E_c = 1360$ Вт/м. Величина АМ1 соответствует прохождению солнечного излучения через безоблачную атмосферу до уровня моря при зенитальном расположении Солнца. Воздушная масса для любого уровня земной поверхности в любой момент дня определяется по формуле

$$AM(x) = \frac{x}{x_0} \cdot \frac{1}{\sin \theta}, \quad (11)$$

где x - атмосферное давление, Па;

x_0 - нормальное атмосферное давление ($1,013 \cdot 10^5$ Па);

θ - угол высоты Солнца над горизонтом.

Наиболее характерной в земных условиях является величина АМ1,5 ($\theta = 41^\circ 49'$). Она принята за стандартную при интегральной поверхностной плотности солнечного излучения $E_c = 1360$ Вт/м. Это необходимо для обеспечения сравнимости результатов исследований различных солнечных элементов. На рисунке 15 приведено спектральное распределение потока фотонов внеатмосферного (АМ0) и наземного стандартизованного (АМ1,5) солнечного излучения при перпендикулярном падении лучей на приемную площадку.

Энергия фотонов, эВ, в излучении с длиной волны λ определяется из соотношения

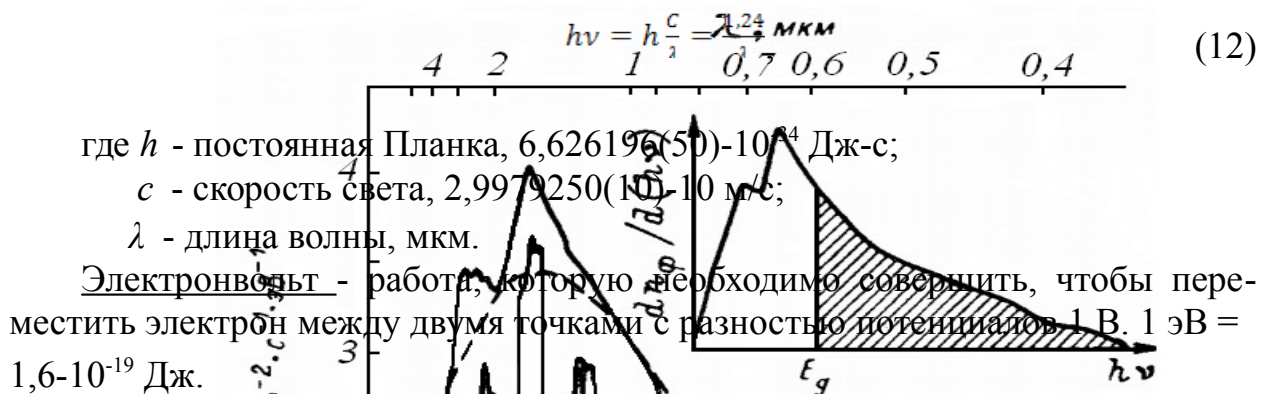


Рисунок 15 – Спектральное распределение потока фотонов солнечного излучения: 1 – внеатмосферное излучение (AM0); 2 – наземное стандартизованное излучение (AM1,5); 3 – спектр излучения абсолютно черного тела при $T_c = 5800$ К. На вставке заштрихована доля полезно используемых фотонов.

Граничная длина волны, начиная с которой фотоны будут поглощаться в материале солнечного элемента с шириной запрещенной зоны (характеризуется отсутствием энергетических уровней, различна по ширине для разных материалов) E_g

$$\lambda_g = \frac{1,24}{\pi} . \quad (13)$$

Более длинноволновое излучение не поглощается в полупроводнике и, следовательно, бесполезно с точки зрения фотоэлектрического преобразования.

2.2 Фотоэлектрические свойства р-п перехода

Солнечный фотоэлемент изготавливается на основе пластины, выполненной из полупроводникового материала, например кремния (см. рис.16). В пластине создаются области с р- и n- типами проводимости. Получают различные типы проводимости путем изменения типа введенных в полупроводник примесей. Например, атомы III группы Периодической системы Д.И. Менделеева, введенные в кристаллическую решетку кремния, придают последнему дырочную (положительную) проводимость, а примеси V группы - электронную (отрицательную).

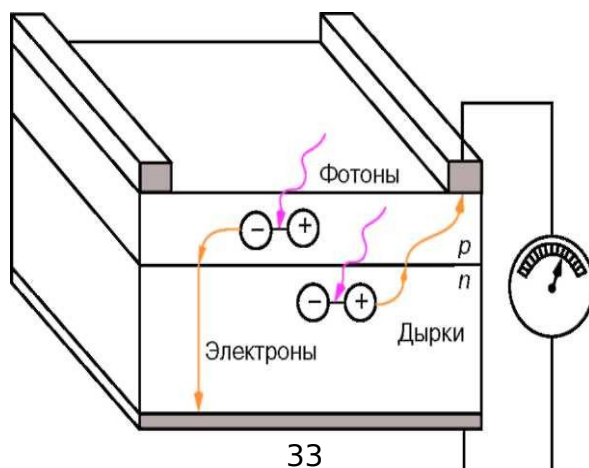


Рисунок 16 – Конструкция простейшего солнечного элемента

Затем изготавливаются нижний и верхний электроконтакты, причем нижний контакт - сплошной, а верхний выполняется в виде гребенчатой структуры (тонкие полосы, соединенные относительно широкой шиной). Контакт р- или n-полупроводников приводит к образованию между ними контактного электрического поля, играющего важную роль в работе солнечного фотоэлемента.

Рассмотрим причину возникновения контактной разности потенциалов. При соединении в одном монокристалле полупроводников р- и n-типа возникает диффузионный поток электронов из полупроводника n-типа в полупроводник р-типа и, наоборот, поток дырок из р- в n-полупроводник. В результате такого процесса прилегающая к р-n переходу часть полупроводника р-типа будет заряжаться отрицательно, а прилегающая к р-n переходу часть полупроводника n-типа, наоборот, приобретет положительный заряд. Таким образом, вблизи р-n перехода образуется двойной заряженный слой, который противодействует процессу диффузии электронов и дырок. Действительно, диффузия стремится создать поток электронов из n-области в р-область, а поле заряженного слоя, наоборот, - вернуть электроны в n-область. Аналогичным образом поле в р-n переходе противодействует диффузии дырок из р- в n-область. В результате устанавливается равновесное состояние: в области р-n перехода возникает потенциальный барьер, для преодоления которого электроны из n-полупроводника и дырки из р-полупроводника должны затратить определенную энергию.

Рассмотрим работу р-n перехода в фотоэлементах. При поглощении света в полупроводнике возбуждаются электронно-дырочные пары. В однородном полупроводнике фотовозбуждение увеличивает только энергию электронов и дырок, не разделяя их в пространстве, то есть электроны и дырки разделяются в «пространстве энергий», но остаются рядом в геометрическом пространстве. Для разделения носителей тока и появления фотоэлектродвижущей силы (фото ЭДС) должна существовать дополнительная сила. Наиболее эффективное разделение неравновесных носителей имеет место именно в области р-n перехода (см. рис. 16). Генерированные вблизи р-n перехода «неосновные» носители (дырки в n-полупроводнике и электроны в р-полупроводнике) диффундируют к р-n переходу, подхватываются полем р-n перехода и выбрасываются в полупроводник, в котором они становятся основными носителями: электроны будут локализоваться в полупроводнике n-типа, а дырки - в полупроводнике р-типа. В результате полупроводник р-типа получает избыточный положительный заряд, а полупроводник n-типа - отрицательный. Между n- и р-областями фотоэлемента возникает разность потенциалов – фото ЭДС, или напряжение в режиме холостого хода. Полярность фото ЭДС соответствует «прямому» смещению р-n перехода, которое понижает высоту потенциального барьера и способствует инжекции дырок из р-области в n-область и электронов из n-области в р-область. В результате действия этих двух противоположных

механизмов - накопления носителей тока под действием света и их оттока из-за понижения высоты потенциального барьера - при разной интенсивности света устанавливается разная величина фото ЭДС. При этом величина фото ЭДС в широком диапазоне освещенностей растет пропорционально логарифму интенсивности света.

При коротком замыкании освещенного р-п перехода в электрической цепи потечет ток, пропорциональный по величине интенсивности освещения и количеству генерированных светом электронно-дырочных пар. При включении в электрическую цепь полезной нагрузки, величина тока в цепи несколько уменьшится. Обычно электрическое сопротивление полезной нагрузки в цепи солнечного элемента выбирают таким, чтобы получить максимальную отдаваемую этой нагрузке электрическую мощность [20].

2.3 Вольт-амперная характеристика солнечного элемента

Поток генерированных светом носителей образует фототок I_ϕ . Величина I_ϕ равна числу фотогенерированных носителей, прошедших через р-п-переход в единицу времени

$$I_\phi = q \frac{P_u}{h\nu}, \quad (14)$$

где q - величина заряда электрона;

P_u - мощность поглощенного монохроматического излучения.

Здесь предполагается, что в полупроводнике каждый поглощенный фотон с энергией $h\nu \geq E_g$ создает одну электронно-дырочную пару. Это условие хорошо выполняется для солнечных элементов на основе Si и GaAs (в кремнии внутренний фотоэффект имеет место для волн с длиной $\lambda \geq 1,1$ мкм, т.е. для видимого, ультрафиолетового и ближнего инфракрасного излучений).

При нулевых внутренних омических потерях в солнечном элементе режим короткого замыкания эквивалентен нулевому напряжению смещения р-п-перехода, поэтому ток короткого замыкания $I_{к.з}$ равен фототоку

$$I_{к.з} = I_\phi, \quad (15)$$

В режиме холостого хода фототок уравнивается «тёмновым» током I_m - прямым током через р-п-переход, возникающим при напряжении смещения $U = U_{xx}$. При этом через р-п-переход протекают следующие токи:

неосновных носителей, основных носителей и первичный фототок. Абсолютное значение «тёмнового» тока

$$I_m = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) = I_\phi, \quad (16)$$

где k - постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $0,86 \cdot 10^{-5}$ эВ/К;

T - абсолютная температура, К;

I_0 - ток насыщения (представляет сумму токов неосновных носителей);

Полный ток через р-п-переход равен

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - I_\phi. \quad (17)$$

Эта формула описывает вольтамперную характеристику освещенного р-п перехода.

Напряжение смещения

$$U = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_\phi + I}{I_0} + 1 \right), \quad (18)$$

откуда напряжение холостого хода

$$U_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_\phi}{I_0} + 1 \right), \quad (19)$$

Рассмотрим подключение к р-п-переходу варьируемого сопротивления нагрузки. Направление тока в нагрузке всегда совпадает с направлением I_ϕ , а сам ток нагрузки I_n равен результирующему току через р-п-переход (17). Принимая направление тока I_ϕ за положительное, для I_n можно записать

$$I_n = I_\phi - I_0 \left(e^{\frac{qU_n}{kT}} - 1 \right), \quad (20)$$

здесь U_n - напряжение на нагрузке, равное напряжению на р-п-переходе.

Выражение (20) описывает нагрузочную вольтамперную характеристику освещенного р-п-перехода. Нагрузочная вольтамперная характеристика арсенид-галлиевого р-п-перехода для значения фототока $I_\phi = 1$ А изображена на рисунке 17, а.

Освещенный р-п-переход в соответствии с выражением (20) может быть представлен в виде эквивалентной схемы (рис. 17, б). Здесь источник тока имитирует генерацию постоянного фототока, не зависящего от напряжения р-п-перехода, а диод представляет собой неосвещенный р-п-переход. При варьировании R_n фототок перераспределяется между нагрузкой и р-п-переходом.

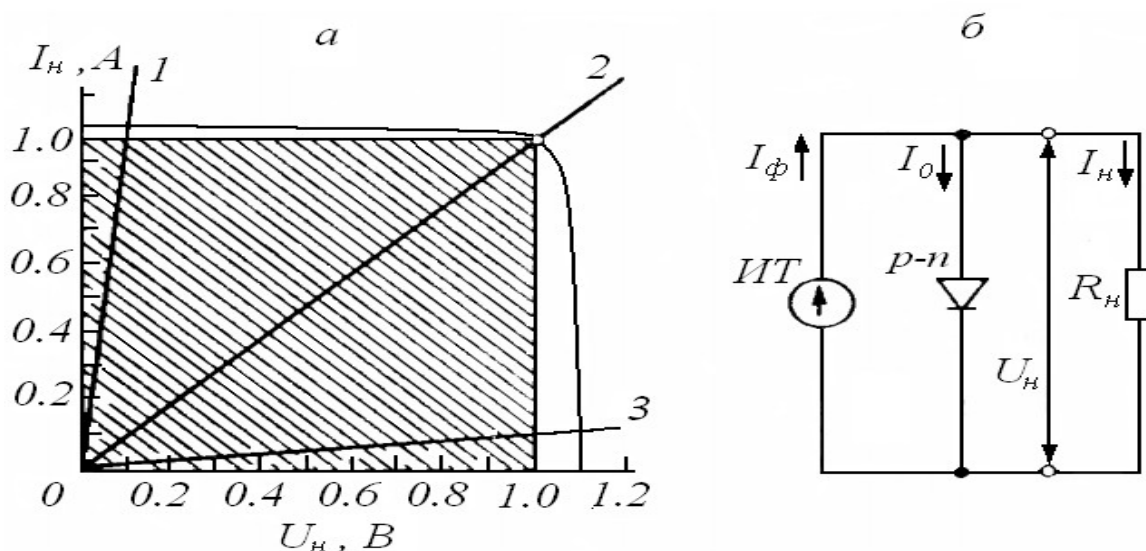


Рисунок 17 – Нагрузочная ВАХ p-n-перехода в GaAs и характеристики R_n при значениях 0,1 (1), 1,026 (2) и 10 Ом (3) (а) и эквивалентная схема освещенного p-n-перехода с сопротивлением нагрузки (б).

Электрическая мощность, выделяемая в нагрузке, определяется по формуле (пренебрегаем единицей в формуле (20))

$$P = I_n \cdot U_n = U_n \left(I_n - I_0 e^{\frac{qU_n}{kT}} \right), \quad (21)$$

В режимах короткого замыкания и холостого хода $P = 0$, поскольку либо U_n , либо I_n равны нулю.

2.4 Наногетероструктурные фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии

Фотопреобразователи (ФЭП) на основе наногетероструктур имеют большие перспективы для космической и наземной солнечной фотоэнергетики. Повышение требований к бортовым системам космических аппаратов приводит к необходимости создания солнечных батарей, обладающих более высокими энергетическими и эксплуатационными характеристиками при увеличении ресурса работы. Наиболее перспективным путем решения этих задач является разработка наногетероструктурных ФЭП из арсенида галлия и родственных соединений, впервые созданных в ФТИ им. А.Ф.Иоффе в 1969 году. За последние десятилетия накоплен большой отечественный и зарубежный опыт эксплуатации космических солнечных батарей на основе AlGaAs/GaAs и AlGaInP/GaAs/Ge наногетероструктур (рис. 18 а,б). Эти батареи обеспечивают увеличение КПД, удельного энергопотребления и радиационной стойкости по сравнению с кремниевыми батареями. Несмотря на большую стоимость гетероструктурных батарей, их использование обеспечивает приблизительно двухкратное снижение суммарных затрат благодаря увеличению в два раза удельного энергопотребления, увеличению ресурса

и снижению расхода топлива на доставку батарей на орбиту, а также ориентацию и стабилизацию космического аппарата.

Высокоэффективные наногетероструктурные солнечные элементы перспективны и для наземных энергосистем, если они используются в системах с концентрированием солнечного излучения. Такое концентрирование (до 1000 крат и более) может осуществляться, например, с помощью дешевых линз Френеля. Солнечное излучение, падающее, например, на поверхность размерами 40 мм х 40 мм, концентрируется на площади менее 3 мм. Элементы при этом не нагреваются из-за малой единичной мощности ($\sim 1,5$ Вт) солнечного излучения, собираемого минилинзами. В таких концентраторных фотоэлектрических системах стоимость электроэнергии может быть уменьшена более чем в два раза, благодаря снижению в 1000 раз площади солнечных элементов. При этом удельный энергосъем в концентраторных фотоэнергосистемах может быть увеличен в три раза за счет большего КПД и обеспечения постоянной точной ориентации на Солнце [22].

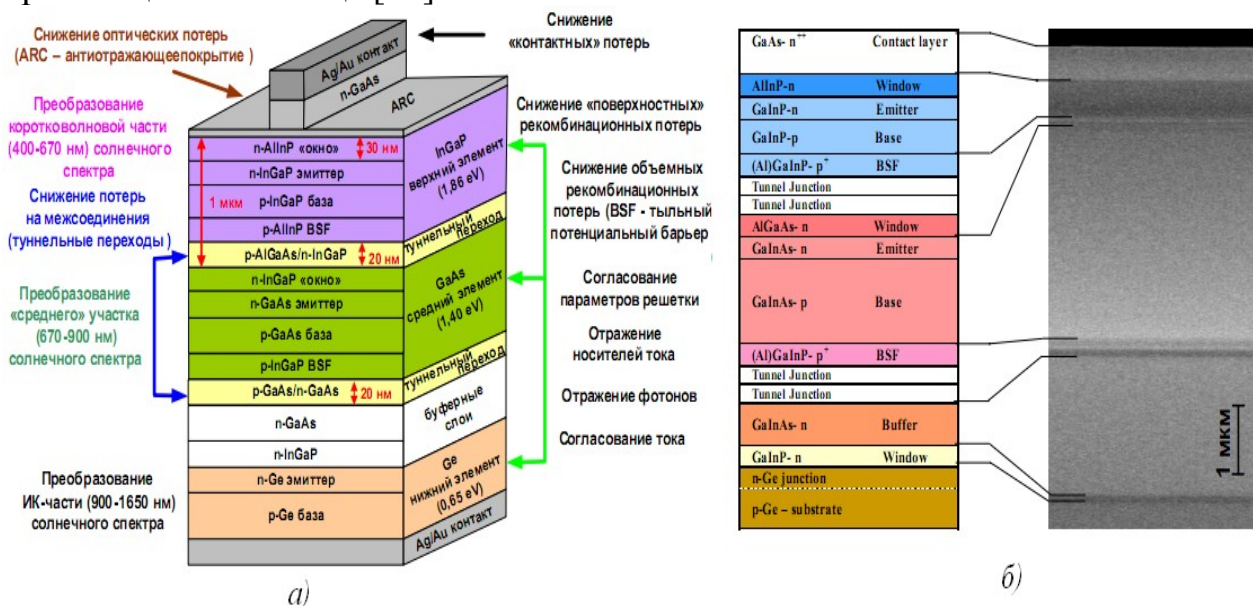


Рисунок 18 – а) Наногетероструктура каскадного ФЭП, обеспечивающего КПД>35% б) Структура и изображение GaInP/GaAs/Ge многослойной наногетероструктуры каскадного ФЭП

Использование промежуточного концентрирования солнечного излучения снижает расход полупроводниковых материалов и увеличивает КПД фотопреобразователей. При этом количество электроэнергии, вырабатываемой установками с концентраторами и системами слежения значительно выше, чем в кремниевых солнечных батареях. Зависимость отражена на рисунке 19.

В соответствии с отчетом, подготовленным рабочей группой Еврокомиссии (EU PV Technology Platform), системы с концентраторами излучения могут обеспечить минимальную стоимость «солнечной» электроэнергии уже в ближайшие годы за счет увеличения КПД, снижения

расхода полупроводниковых материалов и увеличения выработки электроэнергии в системах со слежением за Солнцем.

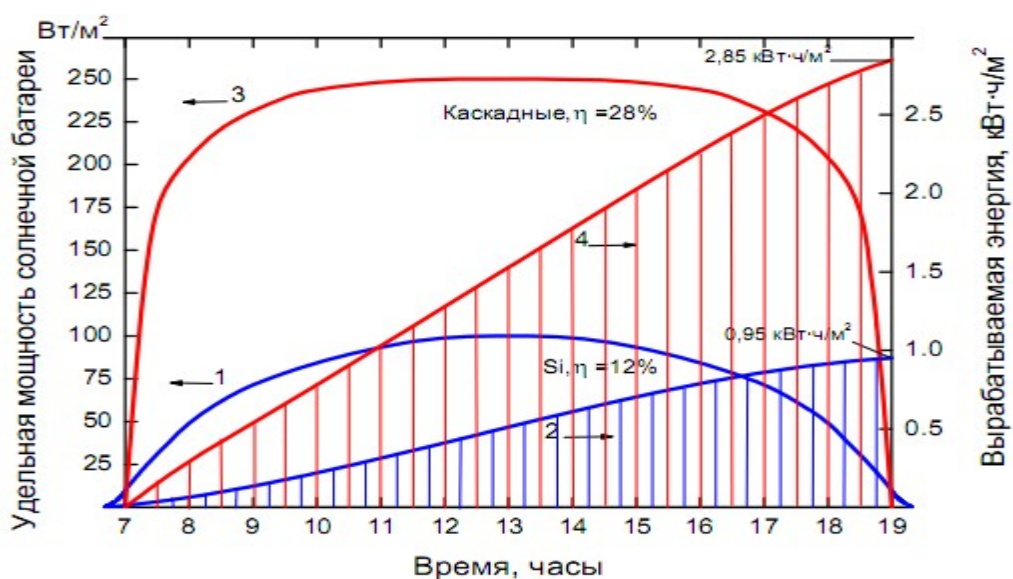


Рисунок 19 – Изменение удельной ($\text{Вт}/\text{м}^2$) генерируемой мощности в течение солнечного дня (кривая 1,3) и наработка ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) электроэнергии (кривые 2,4) солнечных батарей на основе кремния (1,2) и на основе наногетероструктур (3,4)

За последние годы, достигнут значительный прогресс в области создания наногетероструктурных солнечных элементов, в том числе наиболее эффективных фотопреобразователей каскадного типа [23-25].

В представленной на рисунке 18 гетероструктуре трехкаскадного фотопреобразователя осуществляется «расщепление» солнечного излучения на три спектральных участка, для каждого из которых подобран оптимальный полупроводник (Ge, GaAs, GaInP) для эффективного преобразования излучения с потенциалом увеличения КПД до 50%. Потенциал увеличения КПД отражен на рисунке 20.

Ученые ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН предложили солнечные энергоустановки (СФЭУ) на основе высокоэффективных концентраторных фотоэлектрических модулей с линзами Френеля и каскадными солнечными элементами с КПД 36-40 % на основе наногетероструктур [26, 27]. Важным достоинством многопереходных солнечных элементов III-V, представленные на рисунке 18, является то, что они эффективно преобразуют в электричество концентрированное солнечное излучение со степенью концентрации $K = 500$ -1000 солнц, что не могут делать солнечные элементы на основе кремния.

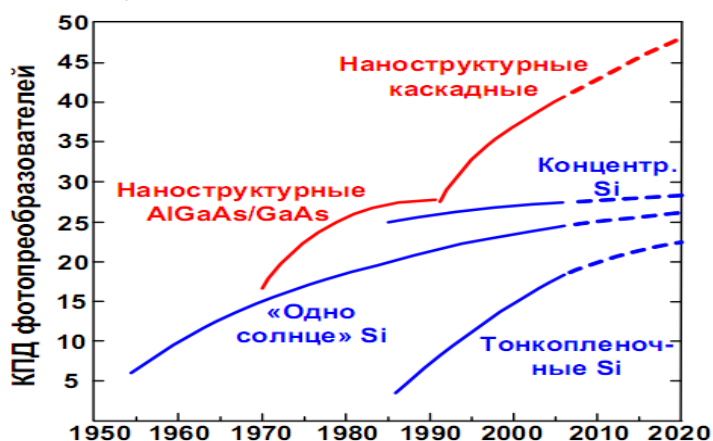


Рисунок 20 – Динамика увеличения КПД фотопреобразователей на основе кремния и наногетероструктур

Разработаны и созданы каскадные солнечные элементы с КПД до 35% при концентрированном солнечном облучении (см. рис. 21).

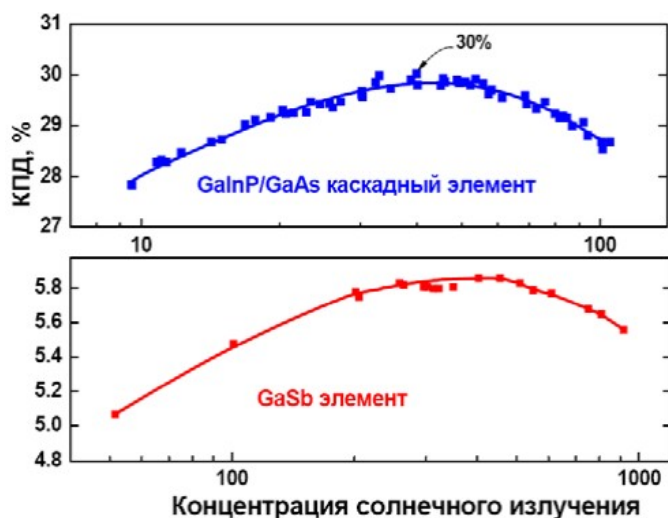


Рисунок 21 – Демонстрация достижения суммарного КПД 35% в структуре «верхним» ИК-прозрачным каскадным элементом из GaInP/GaAs (КПД 30%) и «нижним» ИК-чувствительным элементом из GaSb (КПД 5%)

На основе разработанных наногетероструктурных фотопреобразователей созданы прототипы солнечных энергоустановок с концентраторами излучения, долговременные испытания которых позволяют прогнозировать более чем 20-летний срок службы. При этом удельный энергосъем в концентраторных фотоэнергосистемах может быть увеличен в 3 раза за счет большего КПД и обеспечения постоянной точной ориентации на Солнце. Организация производства таких наземных концентраторных фотоэнергосистем позволит в сотни раз уменьшить потребность в полупроводниковых материалах. Один грамм полупроводникового материала, «работающего» 25 лет в концентраторной фотоэнергосистеме эквивалентен по получаемой электроэнергии ~ пяти тоннам нефти.

2.5 Создание комплекса методик и средств для исследования наногетероструктурных солнечных элементов

Разработке и стандартизации методов и средств измерений параметров солнечных элементов (СЭ) и солнечных батарей (СБ) уделяется большое внимание в мире, что объясняется потребностью в их точной и экономичной аттестации в условиях нарастающего производства. К настоящему времени наибольшее развитие получила метрология планарных СЭ и СБ, преобразующих прямое (неконцентрированное) солнечное излучение. Активное использование нанотехнологий при создании структур для СЭ, а

также освоение космоса предопределили развитие нового направления в солнечной фотоэнергетике - преобразование концентрированного солнечного излучения. Использование концентраторов излучения, изготовленных из дешевых материалов, в сочетании с высокоэффективными концентраторными СЭ малой площади позволяет поднять эффективность преобразования солнечного излучения и снизить стоимость вырабатываемой фотоэлектрическими установками энергии, а следовательно открывает путь к широкому применению фотоэлектрического метода преобразования концентрированного солнечного излучения [28]. В тоже время, усложнение конструкций наногетероструктурных СЭ, работающих при высоких плотностях излучения, и фотоэлектрических модулей (ФЭМ) с концентраторами излучения требует создания специальных методов исследований характеристик как отдельных элементов ФЭМ, так и модулей в целом. Однако, в настоящее время, эти методы исследований не получили должного развития. Метрология концентраторных СЭ и СБ предполагает разработку и создание не только методов прямых и косвенных измерений характеристик СЭ, концентраторов и других элементов конструкции ФЭМ, но и методов корректного моделирования рабочих режимов элементов ФЭМ в лабораторных условиях для прогнозирования их реальных рабочих характеристик при натурных испытаниях и эксплуатации.

Проводимые в лаборатории исследования показывают, что гармоничное сочетание качественных лабораторных методик, их объединение в единую систему в сочетании с квалифицированными натурными измерениями позволяет обеспечить качественно новый уровень в области метрологии наногетероструктурных СЭ и концентраторных модулей на их основе.

Установка для исследования спектральных характеристик многопереходных наногетероструктурных фотопреобразователей

Установка предназначена для измерения спектральных зависимостей внешнего квантового выхода солнечных элементов на основе многослойных гетероструктур, в том числе и многопереходных с (количество рабочих р-п переходов - до трех) в диапазоне длин волн 320-1850 нм (см. рис. 21). Определение значений внешнего квантового выхода в абсолютных единицах производится путем сравнения фотооткликов исследуемого СЭ и контрольного фотоприемника при попадании на них монохроматического излучения модулируемого по частоте механическим прерывателем. Измерение спектральных зависимостей отдельных переходов многопереходного СЭ производится с варьируемым шагом сканирования 10-50 нм в условиях засветки светодиодами повышенной яркости [29].

Измерение спектрального коэффициента зеркального отражения СЭ производится методом сравнения фототоков контрольных фотоприемников при попадании на них монохроматического излучения, причем на второй контрольный фотоприемник излучение попадает после отражения от исследуемого образца. Измерение спектрального коэффициента пропускания производится аналогичным методом, при этом второй контрольный

фотоприемник регистрирует световой поток, прошедший через исследуемый образец.

Задание режимов работы установки, управление процедурой измерения и обработка полученных значений осуществляется с помощью специализированной программы. Результаты измерений представляются в графическом и табличном видах.

Научно-технические и конструкционные решения, реализованные в установке, впервые дают возможность решать задачи всестороннего комплексного исследования спектральных характеристик не только многопереходных солнечных элементов, но и антиотражающих покрытий и оптических материалов.



Рисунок 22 – Установка для исследования спектральных характеристик многопереходных СЭ

Многофункциональный импульсный тестер для характеристики наногетероструктурных солнечных элементов

Тестер предназначен для проведения исследований солнечных элементов (СЭ) на основе многослойных наногетероструктур и малоразмерных фотоэлектрических модулей с концентраторами излучения (см. рис. 23). Тестер построен на базе многофункционального импульсного имитатора солнечного излучения и предназначен для измерения нагрузочных вольт-амперных характеристик (ВАХ) СЭ с количеством рабочих р-п переходов от одного до трех и малоразмерных фотоэлектрических модулей (ФЭМ) на их основе, в том числе с концентраторами излучения, в условиях импульсной засветки длительностью до 1,5 мсек (время, в течение которого освещенность меняется на $\pm 5\%$), а также для измерения темновых ВАХ СЭ. Осветитель построен на основе импульсной ксеноновой лампы в качестве источника излучения и обеспечивает следующие рабочие условия в плоскости расположения исследуемого образца или линзы Френеля:

Режим А: Моделирование спектрального состава и плотности потока излучения. В течение одного светового импульса измеряется вся вольт-амперная характеристика. Режим используется для исследования СЭ с малым временем жизни фотогенерированных носителей. Освещенность в плоскости расположения образца варьируется путем изменения расстояния между

осветителем и элементом (на образце малого размера достигается плотность потока излучения эквивалентная 5000 крат). Неравномерность распределения облученности в плоскости испытаний составляет не более 3-5%

Режим В: Моделирование спектрального состава и плотности потока излучения в течение одного светового импульса. ВАХ измеряется за несколько (15-25) световых вспышек. В течение одного светового импульса длительностью 1 мсек измеряется одна пара значений «ток -напряжение» в момент окончания «плоской» части импульса. анный режим предназначен для измерения солнечных элементов с большим временем жизни неравновесных носителей заряда.

Режим С: Воспроизводится спектр, облученность и угловая расходимость (32 угл. минуты) солнечного излучения в плоскости расположения исследуемого образца или линзы, концентрирующей излучение на СЭ. Световой поток формируется затеняющей диафрагмой диаметром 2,3 мм и оптическим коллиматором апертурой 100 мм. В течение одного светового импульса измеряется вся вольт-амперная характеристика. Неравномерность распределения освещенности в рабочей области не более 5%. Режим предназначен для измерения вольт-амперных характеристик пары «линза - СЭ» в диапазоне температур СЭ от +20 до +150 °С или, в комплекте с двухкоординатной приставки для перемещения малоразмерного фотоприемника, для измерения оптико-энергетических характеристик концентраторов.



Рисунок 23 – Справа: многофункциональный импульсный тестер, слева: импульсный тестер концентраторных фотоэлектрических модулей.

Импульсный тестер концентраторных фотоэлектрических модулей на основе наногетероструктурных солнечных элементов

Тестер предназначен для измерения и записи вольт-амперных характеристик (ВАХ) фотоэлектрических модулей с концентраторами солнечного излучения и солнечными элементами на основе многопереходных наногетероструктур. Выходная импульсная плотность мощности излучения соответствует условиям освещения прямым солнечным излучением мощностью 1 кВт/м² со спектром AM 1,5D.

Многоламповый импульсный тестер солнечных батарей

Тестер предназначен для измерения вольт-амперных характеристик солнечных батарей площадью до 3х2 м при освещении в условиях,

соответствующих спектру АМ0. Эти условия контролируются калиброванным солнечным элементом со спектром фоточувствительности, соответствующим спектру фоточувствительности элементов, составляющих солнечную батарею. В тестере используется активная электронная нагрузка, что позволяет регистрировать как прямую, так и обратную ветвь вольт-амперной характеристики, в том числе и без освещения. Длительность измерения световой характеристики 1.5 мсек, длительность одного цикла измерений «темновая характеристика + световая характеристика» - 3 мсек. Импульс света с постоянной интенсивностью излучения формируется путем сложения световых потоков от нескольких ксеноновых ламп при автоматическом регулировании интенсивности и момента включения каждой лампы [30].

2.6 Определение зависимости мощности ФЭП от солнечной интенсивности

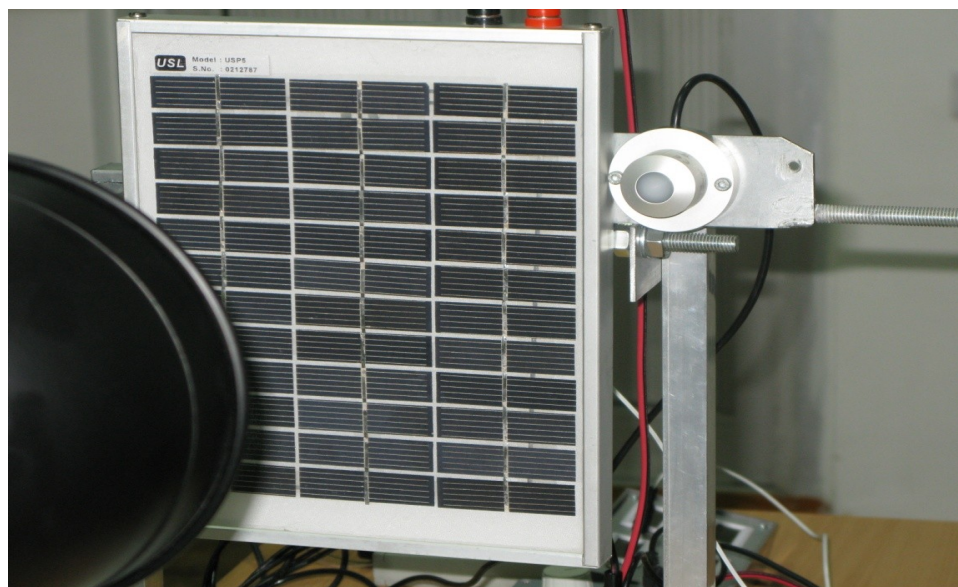


Рисунок 24 – Экспериментальная установка: солнечный фотопреобразователь с датчиком солнечной интенсивности (пиранометр)

Используемое оборудование:

- ФЭП модели USP5
- Пиранометр
- Резистор (340 Ом)
- Амперметр
- Вольтметр
- Соединительные провода
- Источник света

Фотоэлектрическая генерация энергии обусловлена пространственным разделением положительных и отрицательных носителей заряда при поглощении в полупроводнике электромагнитного излучения. В присутствии элек-

трического поля эти заряды могут создавать во внешней цепи электрический ток. В местах переходов или неоднородностей материала существуют внутренние электростатические поля. Внутренние поля фотоэлементов на основе структур полупроводник-полупроводник или металл-полупроводник создают разность потенциалов около 0,5 В и плотность тока порядка $200 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, при плотности потока солнечного излучения около $1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^2$.

Чтобы использовать солнечные панели эффективно, необходимо знать в подробностях ее электрическое поведение, связанное с различными электрическими нагрузками. Рисунок 25 показывает упрощенную экспериментальную схему для того, чтобы произвести экспериментальные измерения, необходимые, для построения кривой вольтамперной характеристики.

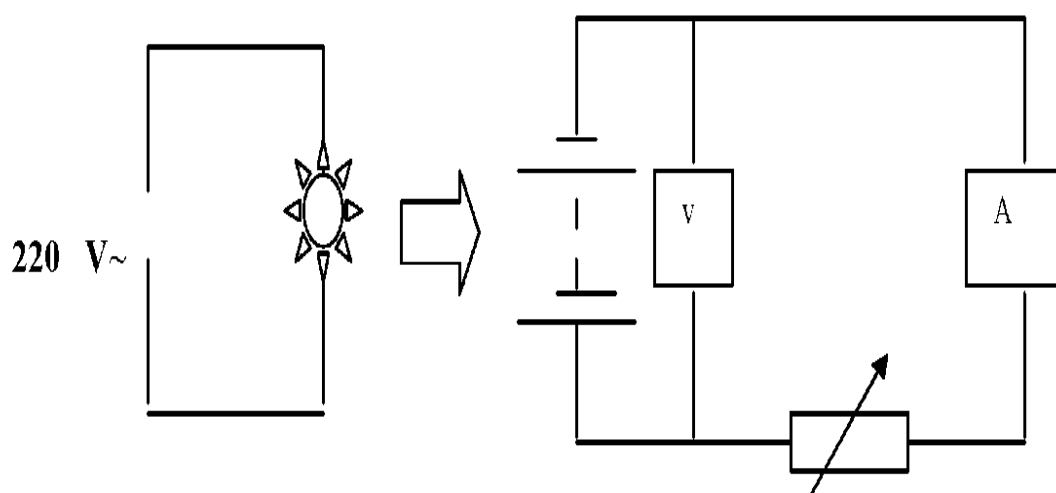


Рисунок 25 – Упрощенная экспериментальная схема

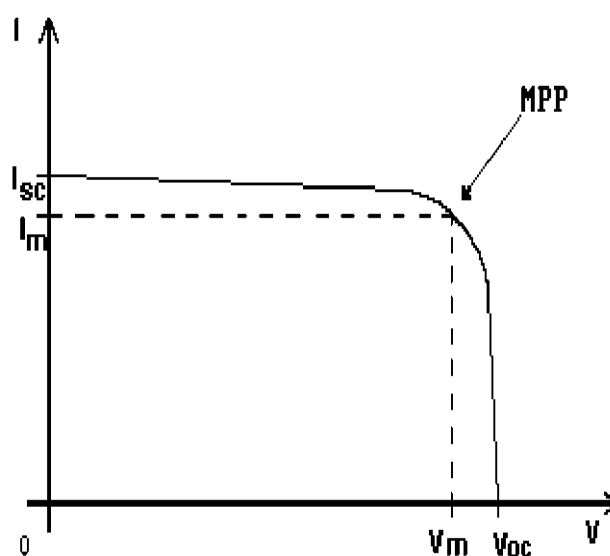


Рисунок 26 – Схематическая кривая вольтамперной характеристики ФЭП

Таблица 5 – Экспериментальные результаты измерений

R, %	СОЛНЕЧНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ, Вт/м ²																				
	100			200			300			400			500			700			850		
	U, В	I, мА	P, мВт	U,В	I, мА	P, мВт	U, В	I, мА	P, мВт	U, В	I, мА	P, мВт	U, В	I, мА	P, мВт	U, В	I, мА	P, мВт	U, В	I, мА	P, мВт
10	0,8	33,8	26,7	0,8	69,0	55,2	1,6	93,2	151,9	1,9	108,4	206,0	1,6	141,2	228,7	2,2	216	479,5	4,7	299	1411,3
20	2,0	33,2	66,4	3,5	67,2	234,5	4,8	89,0	422,8	5,4	103,2	559,3	7,1	132,1	941,9	9,7	207	2012,0	14,0	269	3771,4
30	3,1	32,6	102,0	6,0	66,3	398,5	7,5	86,2	649,1	9,2	97,2	890,4	11,8	124,8	1466,4	14,2	163	2313,0	16,4	181	2964,8
40	4,3	32,1	137,4	8,6	65,4	559,8	10,8	81,6	883,7	12,4	90,1	1119,0	15,1	113,7	1714,6	15,2	114	1727,1	17,2	128	2200,3
50	5,5	32,0	176,0	10,7	62,5	666,9	13,6	76,4	1040,6	15,1	83,5	1256,7	15,9	87,4	1389,7	15,0	92	1380,0	17,5	103	1803,5
60	6,5	30,8	199,9	12,7	59,4	751,4	15,0	71,0	1063,6	16,0	75,0	1200,0	16,1	76,6	1231,0	15,5	76	1181,0	17,7	86	1521,3
70	7,2	30,5	219,6	13,9	56,1	782,0	15,5	62,4	966,0	16,3	65,6	1069,9	16,3	66,5	1080,6	15,6	64	1001,0	17,8	73	1300,9
80	8,3	29,7	246,5	14,5	50,4	732,8	15,6	56,2	877,8	16,5	59,1	973,4	16,4	57,9	946,7	15,7	58	908,9	17,9	64	1143,7
90	9,3	29,2	271,6	14,9	46,7	693,5	15,8	50,0	791,0	16,6	53,3	884,2	16,4	51,8	850,0	15,7	53	831,6	17,9	58	1039,9
100	10,0	28,6	286,0	15,0	44,0	660,0	15,9	46,0	731,4	16,6	48,7	808,4	16,4	47,6	781,6	15,7	47	738,8	18,0	33	594,0

После завершения всего процесса, измеряем так называемое напряжение разомкнутой цепи V_{oc} (напряжение холостого хода), убрав провода связи из резистора для бесконечного сопротивления.

Когда сопротивление будет равным нулю, у тока будет пиковое значение, известное как ток короткого замыкания I_{sc} . Таким способом мы получаем значение I_{sc} .

Важно отметить, что ток короткого замыкания I_{sc} , прямо пропорционален интенсивности солнечного излучения, которое падает на поверхность фотогальванической панели, в то время как напряжение разомкнутой цепи (напряжение холостого хода) V_{oc} зависит только частично от этой интенсивности. Напряжение разомкнутой цепи уменьшается, в то время как температура фотогальванических панелей увеличивается [13]

Для наглядного подтверждения того, что мощность ФЭП напрямую зависит от солнечной интенсивности, построим график по данным из таблицы 5 при неизменной нагрузке.

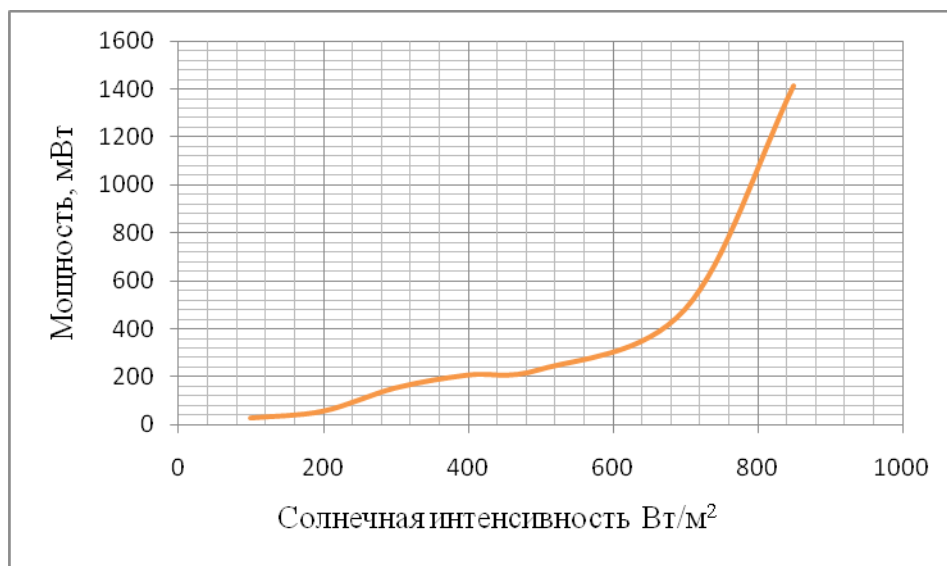


График 1 – Зависимость мощности ФЭП от солнечной интенсивности

Зависимость почти линейная, мощность возрастает при увеличении солнечной интенсивности.

Рассмотрим ВАХ и нагрузочную характеристику ФЭП с наибольшей и наименьшей солнечной интенсивностью.

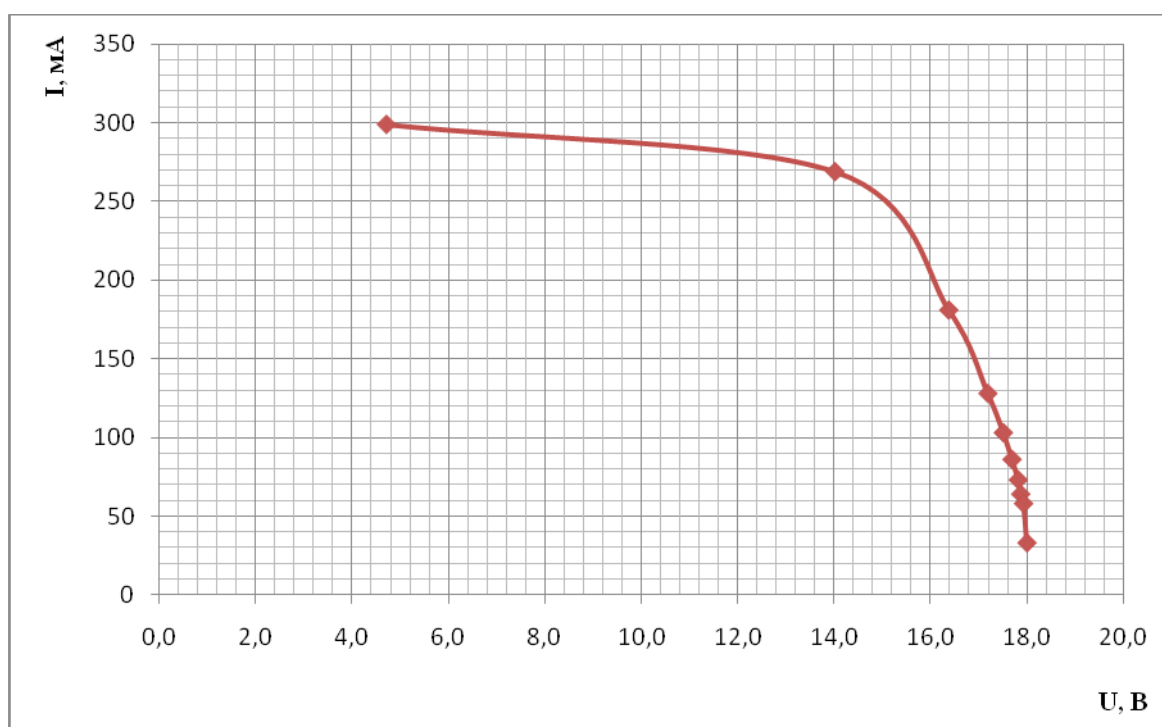


График 2 – Вольтамперная характеристика ФЭП при солнечной интенсивности 850 Вт/м^2

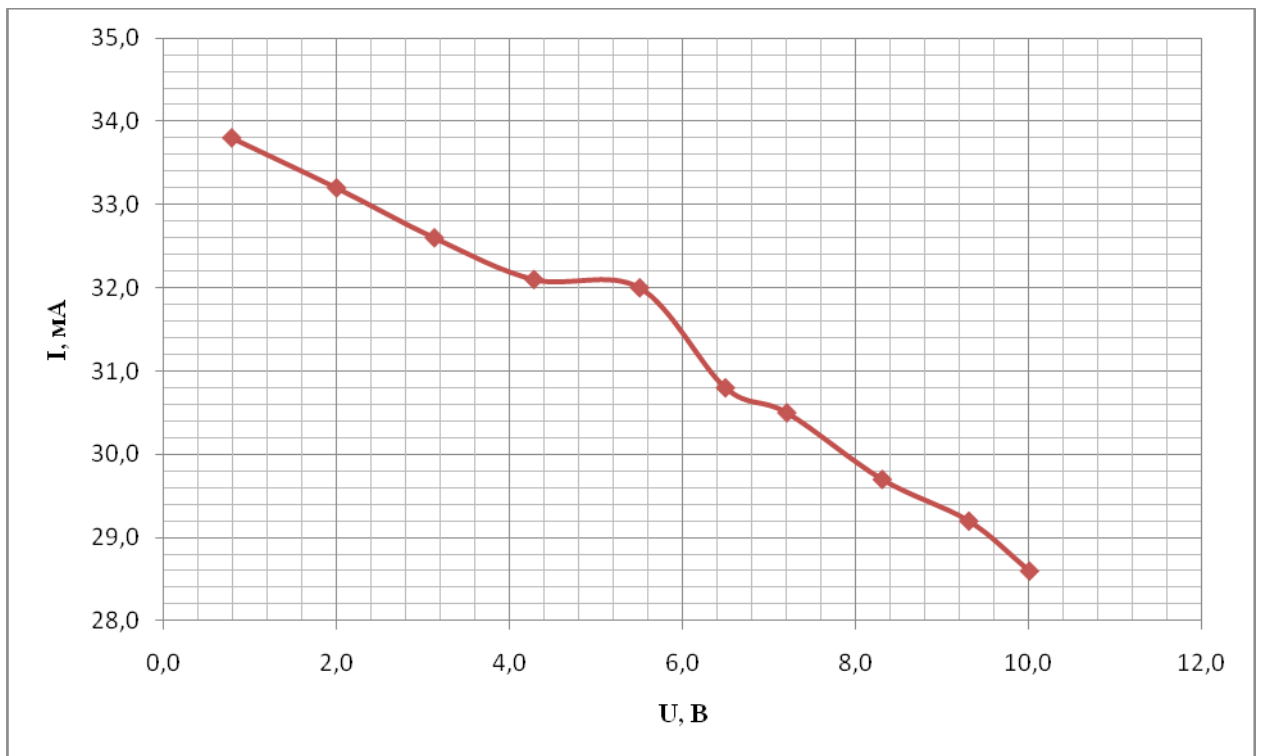


График 3 – Вольтамперная характеристика ФЭП при солнечной интенсивности 100 Вт/м²

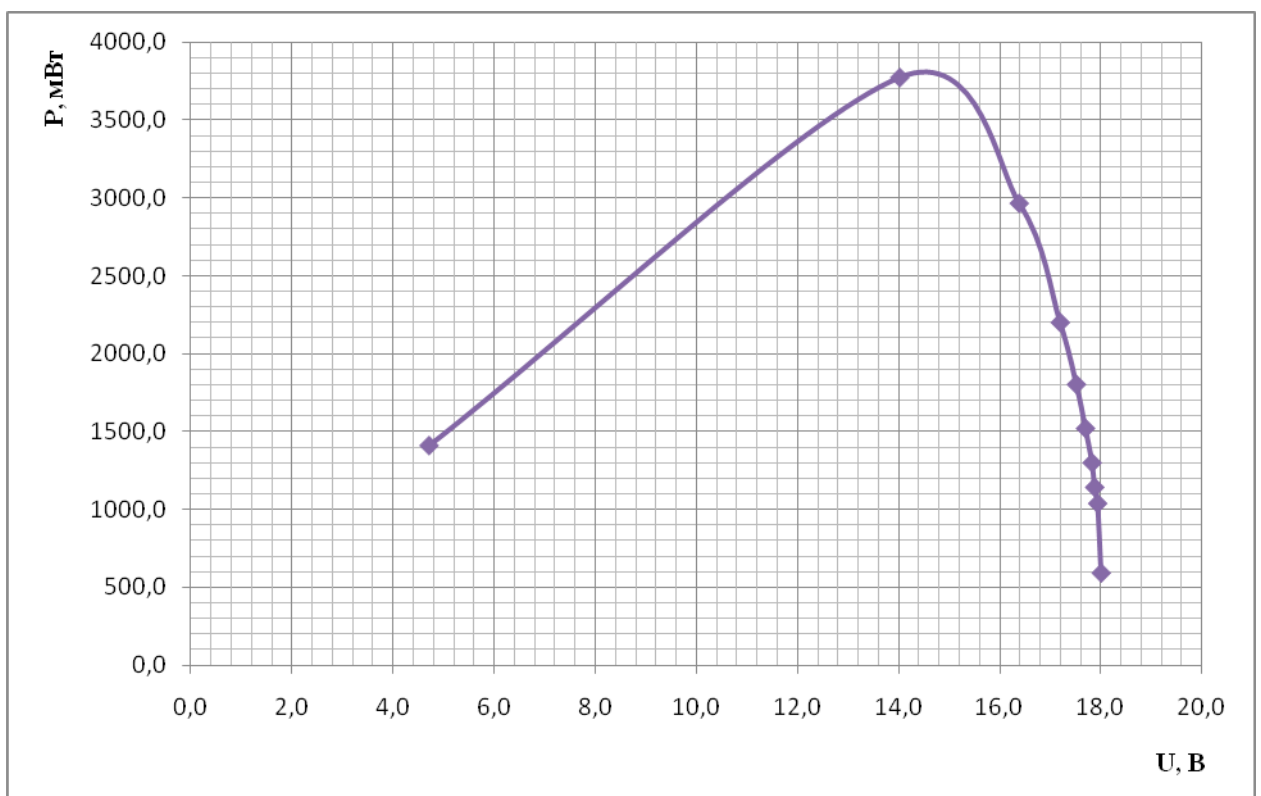


График 4 – Нагрузочная характеристика ФЭП при солнечной интенсивности 850 Вт/м²

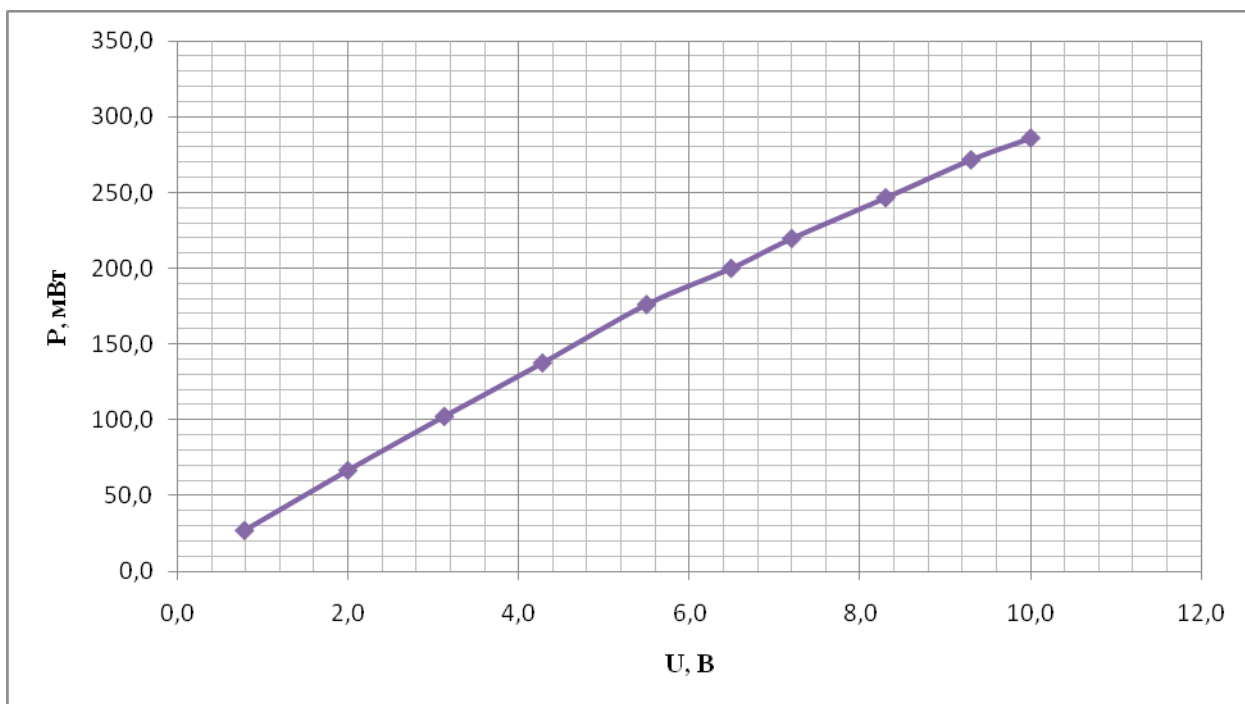


График 5 – Нагрузочная характеристика ФЭП при солнечной интенсивности 100 Вт/м²

По графикам нагрузочной характеристики (граф. 4 и 5) можно определить напряжение $U_{н\ opt}$ соответствующее максимальной мощности, отдаваемой батареей солнечных элементов в нагрузку. Для графика 4 это напряжение составляет 14,6 В, а из графика 5 это напряжение определить не представляется возможным.

По графикам вольтамперной характеристики (граф. 2 и 3) находится ток $I_{н\ opt}$, соответствующий максимальной мощности, отдаваемой батареей солнечных элементов в нагрузку. Для графика 2 этот ток $I_{н\ opt}$ составляет 260 мА. Точка на графике $I_n = f(U_n)$ при $U_n = U_{н\ opt}$ будет соответствовать оптимальному сопротивлению нагрузки $R_{н\ opt}$ [31-33].

2.6 Выводы

С использованием разработанных нанотехнологий возможна организация в Казахстане крупномасштабного производства фотоэлектрических концентраторных модулей. Себестоимость одного ватта установленной мощности концентраторных модулей составит <250 тенге/Вт, т.е. будет снижена приблизительно в два раза по сравнению с существующим мировым уровнем (в ценах 2009 года). Использование концентраторных солнечных энергоустановок в районах без централизованного электроснабжения позволит сделать эти места пригодными для цивилизованной жизни человека.

Преимущества наногетероструктурных каскадных ФЭП:

- Увеличение более чем в два раза (более 40%) КПД каскадных ФЭП на основе полупроводниковых наногетероструктур GaInP/GaInAs/Ge по сравнению с кремниевыми;

- Возможность преобразования 1000-кратно концентрированного солнечного излучения;
- Снижение в 1000 раз расхода полупроводниковых материалов пропорционально степени концентрирования солнечного излучения.

Результатом работы является создание комплекса методик и средств исследований, которые дают возможность производить не только высокоточные измерения характеристик концентраторных СЭ и ФЭМ, но и обеспечивают корректное моделирование различных режимов их работы, что позволяет прогнозировать характеристики СЭ и ФЭМ в реальных условиях эксплуатации на основе результатов лабораторных измерений. В дальнейшем оптимизация имеющихся методов и средств измерений позволит сократить время и стоимость квалификационных испытаний СЭ и ФЭМ и будет способствовать их более широкому применению.

Из результатов исследования ФЭП следует, что при солнечной интенсивности в 850 Вт/м^2 ВАХ ФЭП имеет почти идеальный характер, т.е. графическая зависимость. Что нельзя сказать о ВАХ ФЭП с солнечной интенсивностью в 100 Вт/м^2 . Характеристика имеет линейную зависимость.

3.1 Перспективы использования солнечно-ветровой системы электроснабжения

В Казахстане существует достаточно много потребителей, не охваченных централизованным электроснабжением, которые рассредоточены по территории, удалены от топливных баз и предприятий по переработке топлива. Это в основном поселки, поселения охотников, скотоводов и рыбаков, фермерские хозяйства. Потребители этой категории обеспечиваются энергией от объектов малой энергетики - энергоисточников небольшой мощностью (до 10 кВт). Основными проблемами энергоснабжения таких, изолированных от энергосистем, потребителей являются дальний транспорт топлива и зависимость от его поставок. В наиболее труднодоступных районах эти проблемы усугубляются многозвенной транспортной схемой и ограниченностью сроков сезонного завоза.

Источники малой мощности, используемые для автономного энергоснабжения имеют, как правило, низкие технико-экономические показатели - удельные расходы топлива составляют 300-350 кг у.т./Гкал. Дизельные электростанции и котельные зачастую находятся в неудовлетворительном состоянии. Моторесурс практически исчерпан: износ агрегатов достигает 80-90%. Требуется замена оборудования на современное с улучшенными технико-экономическими показателями и восстановление или строительство новых зданий.

Потребители, получающие энергию от централизованной системы электроснабжения, имеют похожие минусы, т. е. они зависимы от источника питания. К сожалению, в настоящее время большинство оборудования энерговырабатывающих и распределительных предприятий выработало свой ресурс и требует ремонта или замены на современное. Поэтому оно не может обеспечить бесперебойного электроснабжения своих потребителей. Кроме того, цена на электроэнергию постоянно повышается, в результате чего, учитывая рост энергопотребления, происходит постоянное удорожание пользования данным видом услуги.

Развитие малой энергетики необходимо направить на приведение существующих и строящихся энергетических объектов в соответствие с современными требованиями по экономической эффективности, надежности и экологической чистоте.

Одним из вариантов развития малой энергетики, позволяющих сократить объемы потребления органического топлива, может стать применение энергоустановок, использующих возобновляемые природные энергоресурсы [34].

Применение возобновляемых источников энергии позволит:

- полностью исключить или вытеснить часть органического топлива и ослабить зависимость от внешних его поставок;
- снизить себестоимость производства энергии;
- сократить объемы бюджетных дотаций для энергоснабжения малых населенных пунктов;

- уменьшить негативное влияние энергетики на природную среду;
- повысить надежность электроснабжения;
- улучшить условия проживания населения.

Цель исследования: обеспечить бесперебойное электроснабжение лаборатории от комбинированного источника питания, т.е., используя фотоэлектрические панели и ветрогенератор (см. рис. 27). Обычно приход солнечной радиации и наличие ветра находятся в противофазе (т.е. когда светит яркое солнце, обычно нет ветра, а если дует сильный ветер, то солнца нет). Поэтому для обеспечения бесперебойного электроснабжения автономного объекта, уменьшения необходимой мощности ветрогенератора, солнечной батареи и емкости аккумуляторной батареи во многих случаях целесообразно использование комбинированной солнечно-ветровой электростанции.

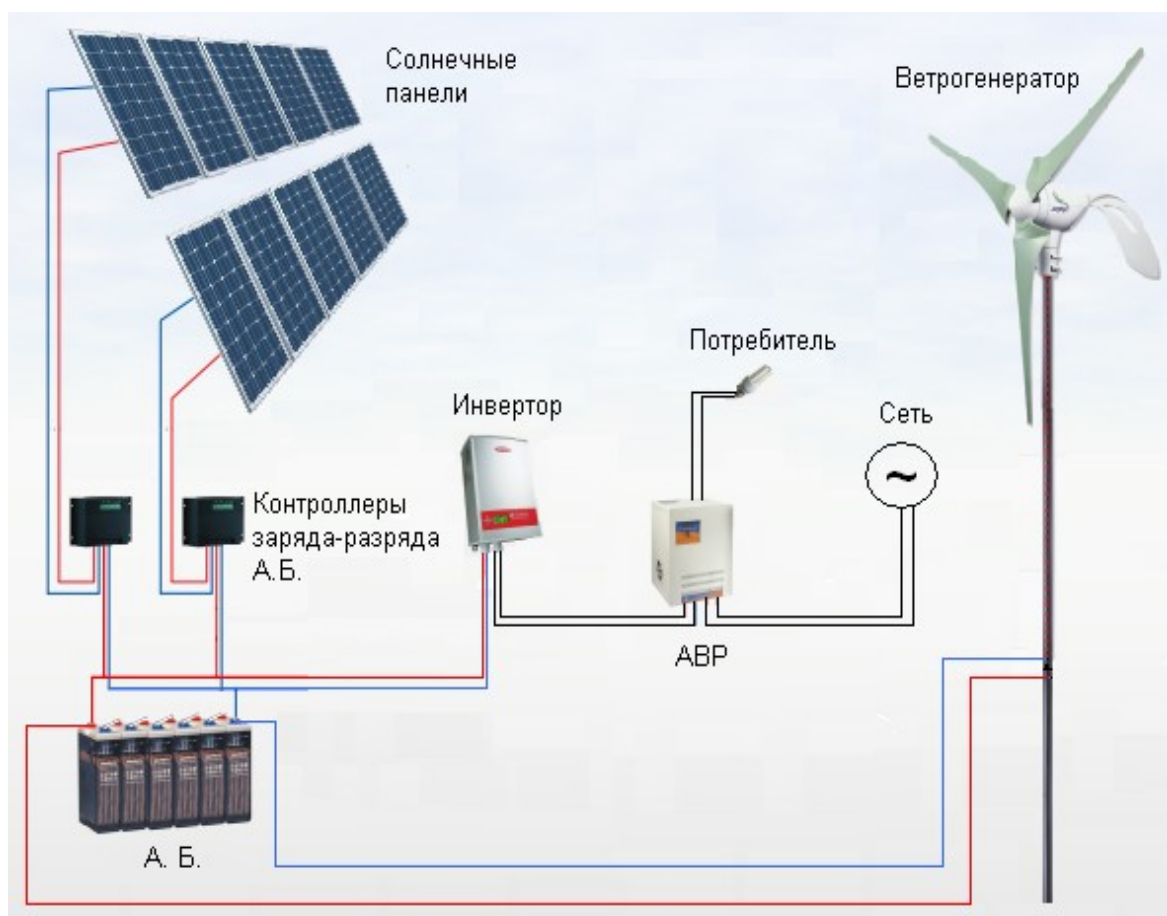


Рисунок 27 – Схема электроснабжения лаборатории

Особенно ощущаются преимущества комбинированных станций при круглогодичном использовании. При этом в зимнее время основная выработка электроэнергии приходится на ветроэлектрическую установку, а летом - на солнечные фотоэлектрические модули. Принцип работы такой системы кратко можно описать следующим образом. Выработка электроэнергии осуществляется ветрогенератором и солнечным модулем. Выработанная электроэнергия заряжает аккумуляторную батарею. Уровень заряда АКБ можно отслеживать с помощью соответствующих контроллеров [35]. Электричество из

аккумуляторной батареи поступает в инвертор, где постоянный ток преобразуется в переменный (220 В/50 Гц) [36].

Преимущества: происходит взаимная «подстраховка» альтернативных источников электропитания:

- ветер может дуть как днем, так и ночью, но вероятна штилевая погода;
- ночью нет солнечного света, но день наступает неизбежно.

Исходя из условий потребления электроэнергии нашей лабораторией, необходимую мощность могут обеспечить:

- 10 солнечных панелей, номинальной мощностью 155 Вт [37] каждая и суммарной площадью 12,88 кв.м.;
- ветрогенератор номинальной мощностью 1 кВт при скорости ветра 12,5 м/с [38].

3.2 Определение общего потребления электроэнергии лабораторией

Основными электрическими приемниками в лаборатории являются компьютеры для выполнения лабораторных опытов, обработки данных и оргтехника для организации учебного процесса.

Освещение осуществляется энергосберегающими люминесцентными лампами. Для проведения занятий интерактивным способом есть видеопроектор.

С целью определения общего потребления электроэнергии лабораторией произведем расчет, полученные данные заносим в таблицу 6.

Таблица 6 – 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	ас ▾	6220.8
Компьютерная техника	11	300	8	ас ▾	31680
Оргтехника	3	1408	1	ас ▾	5068.8
Проектор	1	880	2	ас ▾	2112
Прочее (лабораторные установки)	1	1000	2	ас ▾	2400
Суммарная мощность потребителей переменного тока, подключенных одновременно					10052 Вт
Общая потребность в электричестве за сутки					47481.600000 Вт*ч
Введите напряжение постоянного тока (обычно 12, 24 или 48 В)					24 Вольт

3.3 Мощность источника питания

Для бесперебойного питания лаборатории возобновляемой энергетики необходимо использовать автономные источники электроэнергии, которые

помимо выработки электроэнергии будут заряжать накопители энергии - аккумуляторы.

Для энергопотребления лаборатории в выше приведенном примере потребление составляет 47,482 кВт·ч в день, то источник должен быть $47482/24 = 1978,42$ Вт, округляем до 2000Вт.

При использовании аккумуляторов необходимо $(2000\text{Вт} \cdot 12\text{ч})/24\text{В} = 1000$ А·ч, в рабочее время. Мы используем четыре аккумулятора общей емкостью 440 А·ч и стоимостью 25000 тенге каждый (6СТ-220АП, "Тюменский аккумуляторный завод").

3.4 Определение ветрового потенциала местности

Для создания локальных ветроэнергетических установок (ЛВЭУ) актуальна оценка ветрового потенциала и в городских условиях. Для развития локальной ветроэнергетики в условиях Центрального и Северо-Восточного Казахстана, оценим на примере города Павлодара ветровой потенциал.

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 [39].

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.

Нельзя оценивать энергию ветра, не проведя тщательного измерения его скорости, характерной для данной местности. В большинстве случаев четыре месяца – минимальный период наблюдений, хотя период в один год более предпочтителен [40].

С целью определения ветрового потенциала в условиях городской застройки 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 шесть 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 ($^{\circ}\text{C}$).

Анемометр, соединенный с компьютером через аналого-цифровой преобразователь, измеряет и фиксирует ежеминутные значения скорости ветра.

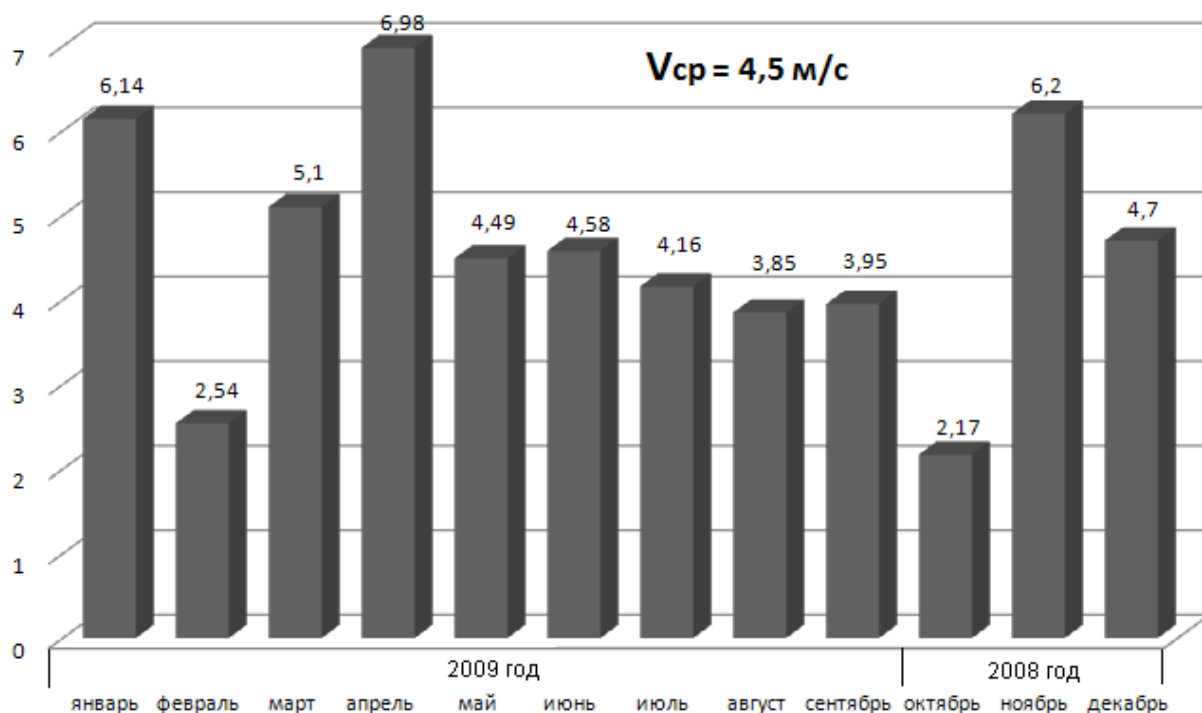


Рисунок 28 – Среднемесячные значения скорости ветра, м/с

Анализ полученных данных показал, что на территории г. Павлодара ветровой потенциал умеренный. На рисунке 28 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.

Для ВЭУ малой мощности (до 5 кВт) 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.

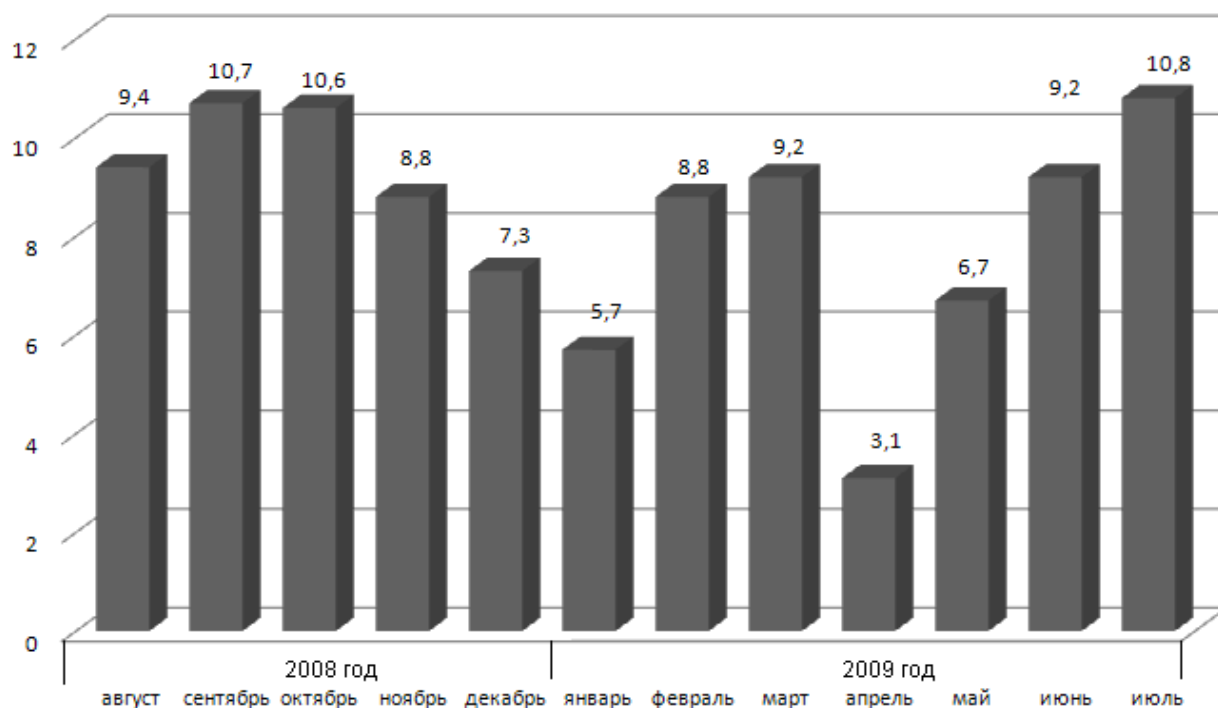


Рисунок 29 – Количество последовательных часов, когда скорость ветра не превышает 2,5 м/с

На рисунке 29 изображена гистограмма 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 [41].

3.5 Надежность электроснабжения

В целях достижения надежного бесперебойного электроснабжения лаборатории предусмотрен резерв, представляющий собой электрическую сеть, вводимый в действие устройством автоматического включения резерва – АВР (см. рис. 30) [42]. Использование электросети, как источника питания, сводится к минимуму, т.е. сеть будет задействована на короткое время, лишь в том случае, когда потребление электроэнергии превышает выработку.

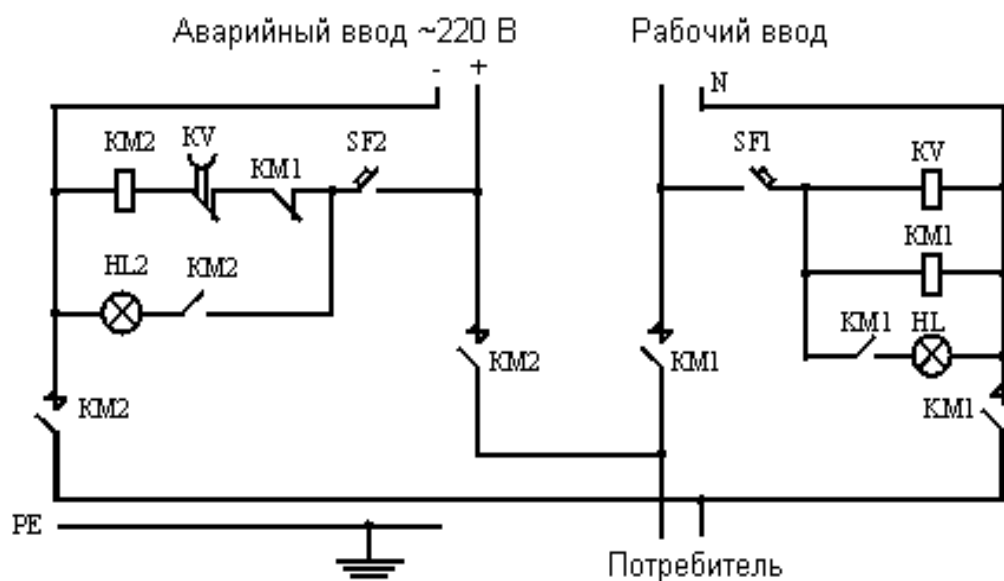


Рисунок 30 – Принципиальная электрическая схема АВР серии ЯУ (ШУ) 8250

3.6 Капитальные вложения

Для создания комбинированной солнечно-ветровой системы электроснабжения, необходимы капитальные вложения (см. таблицу 7).

Таблица 7 – Капитальные вложения

№	Наименование	Кол-во, шт.	Стоимость, тенге	ΣСтоимость, тенге
1	Солнечная панель SW 155 mono	10	66 000	660 000
2	Ветрогенератор AIRDOLPHIN Z-1000	1	896 400	896 400
3	Инвертор FRARON SW2200W24V	1	141 050	141 050
4	Контроллеры заряда-разряда STECA PR 3030	2	46 500	93 000

5	Аккумуляторы 6СТ-220АП	4	25 000	100 000
6	Устройство АВР серии ЯУ (ШУ) 8250	1	17 500	17 500
Итого				1 907 950

Из приведенной выше таблицы следует, стоимость проекта составляет 1 907 950 тенге. С учетом того, что цена за один кВт·ч в городе Павлодар восемь тенге, данная система электроснабжения оправдывает себя за четыре года, т.к. потребляемая мощность - 47,482 кВт·ч в сутки [43].

3.7 Выводы

Таким образом, рассмотрев комбинированную солнечно-ветровую систему электроснабжения, можно сделать вывод о реальных перспективах её применения.

Она практически не имеет минусов. Главный и единственный её минус – высокая цена, которая, в конечном итоге, оправдывает себя через несколько лет. Цена на электрическую энергию растет каждый месяц, поэтому проект оправдывает себя на много раньше. Но с другой стороны, вложив деньги один раз, можно многие годы обеспечивать себя качественным электричеством и, ни от кого не зависеть. Тем более что технические параметры и характеристики используемого оборудования позволяют эксплуатировать их долгие годы, без какого-либо обслуживания.

Возможность совмещения ветрогенератора и солнечных панелей обеспечивает бесперебойное надежное электроснабжение, т.к. во время полного безветрия всегда светит Солнце и, наоборот, в пасмурные дни дует ветер, достаточный для работы ветрогенератора.

Данная система электроснабжения не нарушает экологическую обстановку в регионе, потому что нет никаких вредных выбросов в атмосферу.

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

4 АВТОНОМНЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ

4.1 Возможности создания автономных энергоустановок

Автономные энергоустановки мощностью от нескольких сотен ватт до нескольких сотен киловатт являются широко востребованными в различных секторах экономики и географических регионах Казахстана, где вне систем централизованного энергоснабжения проживает более 10 млн. человек. Сегодня энергоснабжение автономных потребителей обеспечивается в основном с помощью бензиновых и дизель-генераторов, эксплуатация которых сопряжена с большими затратами на периодический завоз топлива и обслуживание. Дополнительными негативными факторами использования таких установок являются выбросы продуктов сгорания в окружающую среду и шум. Серьезной экологической проблемой является загрязнение окружающей среды топливными контейнерами.

В последнее время все более широкое применение находят комбинированные дизель-ветровые или дизель-фотоэлектрические автономные энергоустановки, использование в которых возобновляемых источников позволяет экономить органическое топливо. Однако такие технические решения не приводят к кардинальному решению проблемы. Они несут с собой большинство существенных недостатков, характерных для традиционных установок на привозном органическом топливе.

Целью данной работы является анализ возможности создания автономных энергоустановок, работающих только на возобновляемых источниках энергии, среди которых солнечная и ветровая энергия являются наиболее универсальными и повсеместно доступными.



Рисунок 31 – Диаграмма среднедневных сумм солнечной радиации за год при оптимально ориентированной поверхности

Казахстан, как и другие страны, располагает значительными ресурсами солнечной и ветровой энергии. На рисунке 31, представлены среднедневные суммы солнечной радиации за год при оптимально ориентированной поверхности по территории Казахстана. Диаграмма построена с использованием результатов многолетних спутниковых наблюдений NASA [45] и собственных метеоданных [2,11]. С точки зрения оценки ресурсов солнечной энергии, наиболее объективными являются данные о приходе солнечной радиации на поверхности, оптимально (т. е. обеспечивающие максимальный сбор солнечного излучения) ориентированные в пространстве. Солнечные коллекторы и фотопреобразователи обычно устанавливаются неподвижно (без систем слежения за Солнцем) с ориентацией приемной поверхности на юг. При этом в зависимости от широты местности и периода эксплуатации установки существует оптимальный угол наклона приемника к горизонту, равный при круглогодичной эксплуатации примерно широте, а при сезонной (теплый период года) – широте - 10° – 15° . Приведенная диаграмма распределения поступлений солнечной радиации построена для оптимальных углов, соответствующих максимальным годовым суммам солнечной энергии. Следует подчеркнуть, что при этом каждой географической точке соответствует свой оптимальный угол наклона приемника к горизонту. Интересно отметить, что при таком подходе к оценке ресурсов в существующих границах Казахстан наиболее солнечными регионами являются Южно-Казахстанская и Кызылординская области (среднегодовое поступление солнечной энергии 1400–1500 кВт·ч/м²·год). Поступления солнечной радиации в наиболее солнечных регионах страны практически не уступают «солнечной» Испании, а в некоторых районах и превосходит. Даже в самых северных районах страны, например в Павлодаре, имеются значительные ресурсы для эффективного использования солнечной энергии [2].

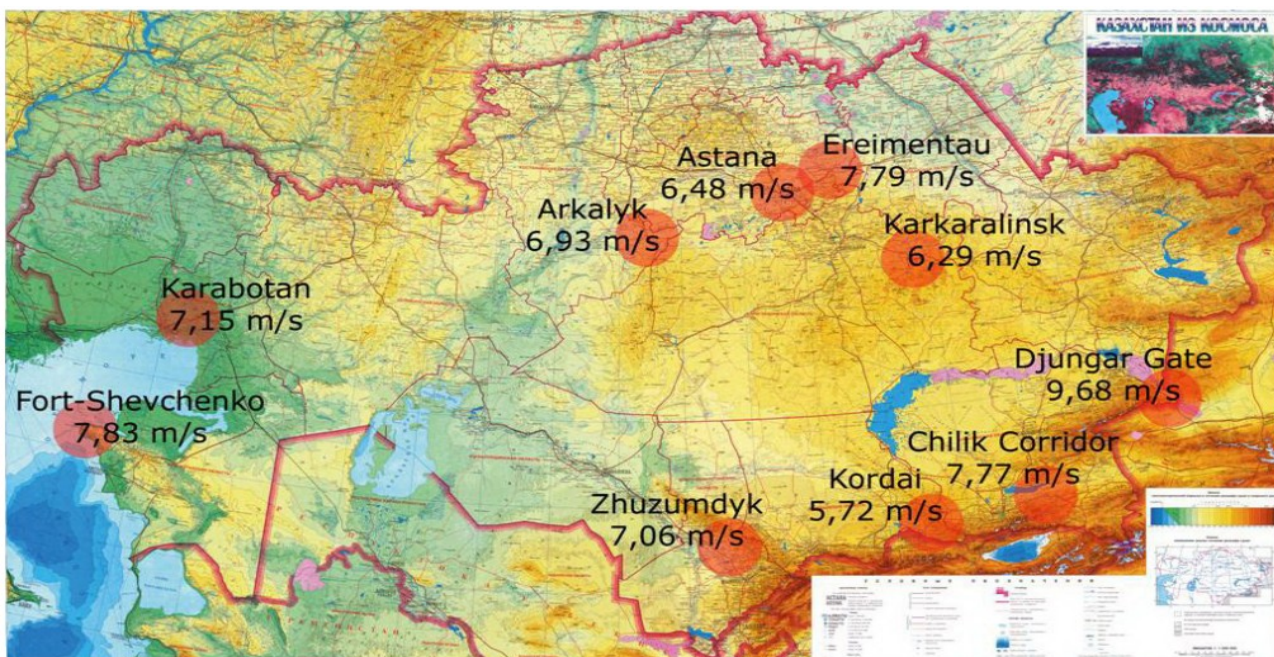


Рисунок 32 – Среднегодовая скорость ветра на высоте 80 м

Что касается ветра, в Казахстане имеется не менее 10 районов с большим ветропотенциалом, где средняя скорость ветра составляет 8-10 м/с (см. рис. 32), тогда как европейские ветростанции работают при средней скорости ветра 4-5 м/с. Наиболее известны в этом плане потенциальные возможности «Джунгарских ворот» — района, расположенного в Алматинской области, на границе с Китаем, и «Шелекского коридора», находящегося в этом же районе. Из других перспективных районов можно отметить Ерментау — 3700 кВт/ч на кв. м (Акмолинская область), Форт-Шевченко 4300 кВт/ч на кв.м (Мангистауская область), Курдай — 4000 кВт/ч на кв.м (Жамбылская область) и некоторые другие. 50 тыс.кв. км территории Казахстана со среднегодовой скоростью ветра выше 7 м/с, что позволяет выработать примерно 1000 ТВт·ч электроэнергии в год [41].

При получении электрической энергии от автономных установок на основе солнечной и ветровой энергии основной задачей является проблема аккумулирования энергии.

Как показывают отечественные и зарубежные исследования, применение в составе солнечно-ветровых установок водородных накопителей, представляющих собой комбинацию электролизера воды, аккумуляторов водорода и кислорода и батареи топливных элементов, обеспечивающих эффективное (практически без потерь) долгосрочное аккумулирование энергии, может обеспечить кардинальное решение указанной выше проблемы аккумулирования энергии и позволит создать полностью автономные экологически чистые автоматизированные солнечно-ветровые энергоустановки с высокими потребительскими качествами.

Изложенное выше определяет целесообразность проведения расчетных и экспериментальных исследований в обоснование оптимальных конфигураций автономных энергоустановок, состава и конструкции комплектующего

оборудования с учетом реальных климатических условий эксплуатации и особенностей потенциальных потребителей.

4.2 Концепция автономной энергоустановки на ВИЭ

Упрощенная структура автономной энергоустановки на ВИЭ изображена на рисунке 33.

В состав рассматриваемой энергоустановки входят первичные источники энергии: фотоэлектрические преобразователи и ветроустановка, выработка энергии которыми, как правило, существенно не совпадает с графиками потребления энергии потребителем, который, в общем случае, нуждается в электроэнергии, в тепловой энергии, а также, в ряде случаев, и в холоде. В этой ситуации ключевым компонентом автономной системы является система аккумулирования, преобразования и вторичной генерации энергии. Для обеспечения наиболее эффективного преобразования первичных видов энергии и удовлетворения нужд потребителя энергоустановка должна быть снабжена «умной» системой автоматического управления.

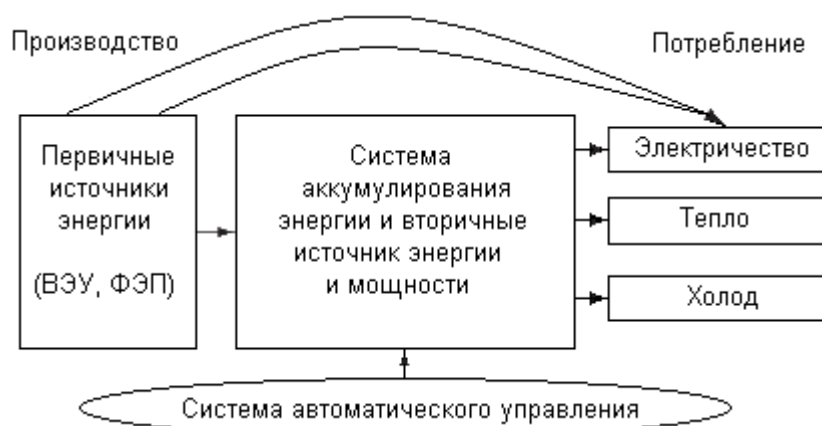


Рисунок 33 – Основные компоненты автономной энергоустановки на ВИЭ

Выработка энергии фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП) и ветроустановкой сильно зависит от климатических условий эксплуатации установки. Мощность ФЭП изменяется во времени пропорционально облученности их рабочей поверхности солнечным излучением. Мощность ветроустановки на основном рабочем участке пропорциональна кубу скорости ветра. Поступление солнечного излучения на поверхность земли, также как и скорость ветра, изменяются в зависимости от погодных условий, имеют ярко выраженные суточные и сезонные зависимости. Так, среднемесячный летний приход солнечного излучения в средних широтах в 4–5 раз превышает среднемесячное поступление в зимние месяцы.

Для краткосрочного аккумулирования электроэнергии (до нескольких часов) в составе автономных энергоустановок используются электрохимические аккумуляторы. Однако их размеры, стоимость и надежность становятся, как правило, неприемлемыми при попытках построить систему аккумулирования

долгосрочного хранения энергии. В этой ситуации включение в состав энергоустановки водородного накопителя энергии (см. рис. 34), представляющего собой комплекс из электролизера воды, ресиверов водорода и кислорода необходимой емкости, в которых газы хранятся под давлением, и батареи топливных элементов, оказывается привлекательным, поскольку такое техническое решение позволяет решить проблему долгосрочного хранения энергии практически без потерь.

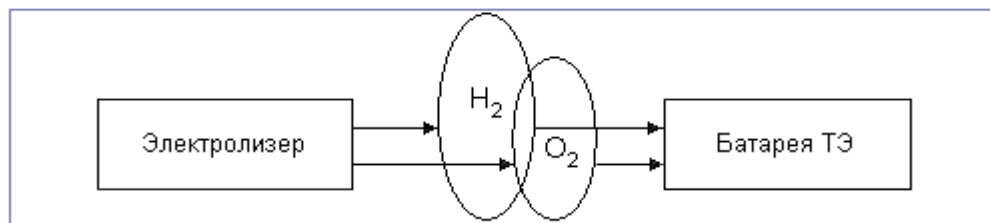


Рисунок 34 – Схема водородного накопителя

Вместе с тем, обеспечение большого ресурса работы топливных элементов и электролизеров требует стабилизации режимов потребления / отбора мощности; их эксплуатация в маневренных режимах должна быть ограничена. В этой связи целесообразно создание комбинированных энергоустановок, в которых сочетаются различные источники электрической энергии, одни из которых, ввиду их высокой энергоемкости (топливные элементы), можно рассматривать как источники энергии, а другие (например, аккумуляторные или конденсаторные накопители) – как источники мощности, обеспечивающие пиковые и переходные режимы потребления мощности нагрузкой. Согласовать режимы работы источников энергии и мощности можно с помощью соответствующих электронных преобразователей.

Разработка полностью автономной эффективной энергоустановки, использующей в качестве первичных источников энергии солнечную и ветровую энергию, связана с поиском и обоснованием ее оптимальной конфигурации и состава с учетом реальных климатических условий эксплуатации, характеристик используемого оборудования, а также особенностей потребителя, включая ожидаемые переменные графики потребления энергии. Критерием оптимальности должна быть минимальная стоимость энергоустановки при гарантированном энергообеспечении потребителя. Решение задачи создания таких оптимальных автономных энергоустановок возможно лишь на основе сочетания расчетно-теоретических и экспериментальных исследований, основные направления которых обсуждаются ниже.

4.3 Математическое моделирование солнечно-ветровых автономных энергоустановок

Для построения математической модели работы солнечно-ветровой автономной энергоустановки, прежде всего, необходимо обеспечить

возможность моделирования первичных возобновляемых источников энергии с характерной для них неравномерной генерируемой мощностью в зависимости от географической точки, сезона и времени суток. Для этой цели используется собственная климатическая база среднемесячных данных, созданная в лаборатории «Возобновляемая энергетика» [2,11], а также на основе обобщения результатов многолетних метеорологических наблюдений на отечественных метеостанциях [44] и спутниковых данных NASA [45]. Реальные климатические условия формируются в формате так называемого типичного метеогода (годовые часовые последовательности интенсивности солнечной радиации, скорости ветра, температуры наружного воздуха и других метеопараметров), что позволяет моделировать работу первичных источников в любой заданной географической точке. Генерация типичного метеогода обеспечивается с помощью современных специализированных программных средств, таких как программа TRNSYS [46-50], предназначенная для моделирования сложных систем преобразования энергии возобновляемых источников в характерных для них нестационарных режимах работы.

Модульный характер TRNSYS, наличие исходного кода и четких правил описания и связывания модулей определяют открытый характер TRNSYS, позволяя пользователю создавать модули описания собственных элементов и включать их в моделируемые системы, расширяя таким образом возможности среды моделирования. Кроме того, независимой переменной при моделировании не обязательно должно быть время, что дает возможность проводить вариантыные расчеты, исследуя поведение квазидинамической системы при изменении соответствующих параметров.

Расчетная схема солнечно-ветровой энергоустановки включает в себя как стандартные модули, входящие в поставляемую конфигурацию пакета TRNSYS, так и специально написанные для решения поставленной задачи. Из стандартных модулей в схеме использованы программы генерации часовых последовательностей сумм солнечной радиации, температуры окружающего воздуха и скорости ветра в формате типичного метеогода по среднемесячным данным (TMY), пересчета потоков солнечной радиации с горизонтальной на наклонную поверхность (PV orientation), модули визуализации временных процессов (Type 65) и контроля интегральных критериев работы энергоустановки (Efficiency). Специально разработаны модули расчета батареи фотоэлементов (PV-module) и ветроагрегата (WindTurbine), нагрузки (Load), аккумуляторного накопителя (Battery), электролизера с согласующим преобразователем (Electrolyser), ресивера (Reciver), батареи топливных элементов с согласующим преобразователем (FuelCell), а также модель блока управления (Controller). Модель допускает расширение состава и характеристик блоков. Информационная схема установки (схема связей между ее элементами) в системе TRNSYS приведена на рисунке 35.

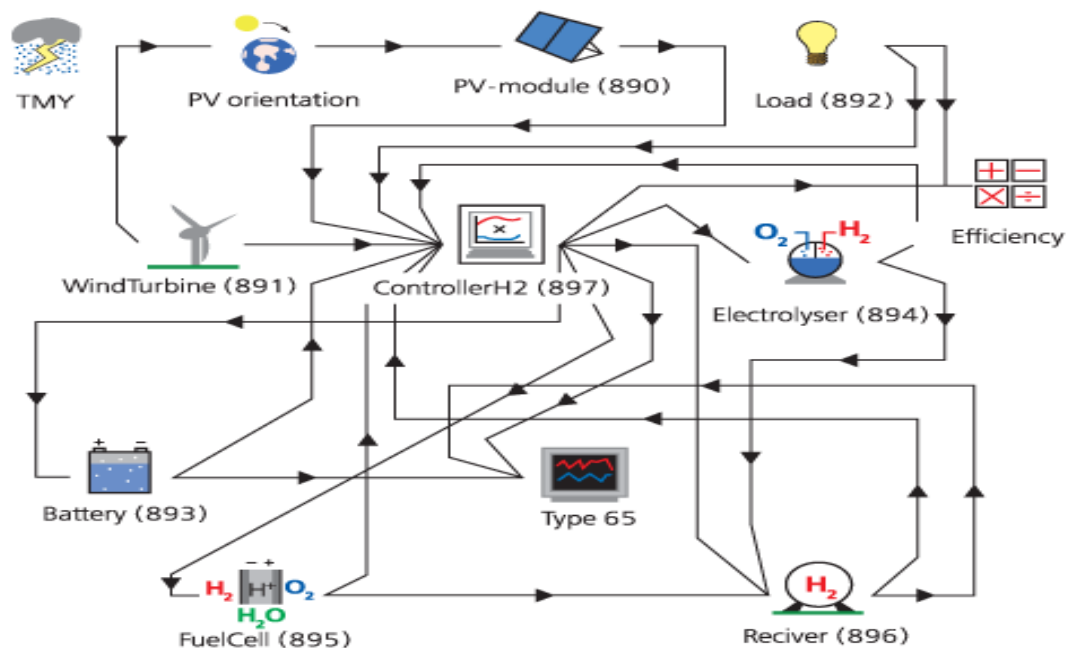


Рисунок 35 – Информационная схема моделируемой автономной энергоустановки

Программы расчета отдельных блоков модели позволяют произвольно задавать основные технологические параметры устройств: КПД, коэффициенты потребления мощности на собственные нужды, минимальные уровни потребления в ждущем режиме, производительности и удельные потребления (в том числе нулевые значения, фактически исключающие отдельные блоки из конфигурации энергоустановки), а также уровни максимальной емкости и интенсивности. Блоки индикации и контроля интегральных критериев позволяют отображать информацию о состоянии процессов в блоках (значения мощностей, накопленных энергий и объемов, значения потерь энергии), а также отображают интегральные значения основных показателей: интегральный КПД, потребленную за определенный период (месяц, сезон, год) энергию, генерируемую первичными источниками энергии, и коэффициент ее использования, среднюю энергию, потребляемую нагрузкой, дефицит энергии (мощности) в случае невозможности полного обеспечения требования нагрузки, коэффициент покрытия мощности нагрузки, массу отдельных устройств и общую массу энергоустановки, стоимости, в том числе стоимости 1 кВт·ч генерируемой энергии, потери энергии электрические и тепловые и т. д.

Важным модулем компьютерной модели является блок управления, который функционирует по сигналам текущего состояния устройств, источников и нагрузки, и позволяет управлять уровнями заряда / разряда буферной батареи, ресивера, включением и текущими значениями мощностей электролизера и батареи топливных элементов, а также возможным уровнем подачи мощности в нагрузку. Алгоритм работы блока управления основан на использовании критерия максимального совокупного КПД энергоустановки, для чего разработан и применен принцип приоритетного использования энергии источников. Энергоснабжение потребителя осуществляется преимущественно напрямую от первичного источника (с максимальным КПД),

минуя промежуточные стадии преобразования энергии. При избыточной мощности первичного источника электроэнергия накапливается в электрохимических накопителях и, наконец, избыточная мощность позволяет накапливать водородное топливо. Аналогичный принцип используется для обеспечения текущего потребления мощности нагрузкой: при дефиците мощности первичного источника реализуется энергия электрохимических накопителей, которая, при необходимости, пополняется за счет батареи топливных элементов, использующей накопленное ранее водородное топливо. Разработанный алгоритм управления комбинированной энергоустановкой может в дальнейшем использоваться в реальных устройствах.

Выбор той или иной степени детализации функциональных характеристик устройств автономной водородной комбинированной энергоустановки является определяющим условием полезности компьютерной модели установки с точки зрения достижения поставленных целей моделирования. Понятно, что каждое из устройств энергоустановки является сложным объектом, в котором протекают разнообразные взаимосвязанные физические процессы, причем для многих из них (например, топливных элементов с протонообменной мембраной) пока отсутствует не только полная физическая модель, но по некоторым показателям отсутствуют и достоверные экспериментальные данные, не говоря уже об отсутствии теоретического обоснования модели процессов. С другой стороны, чрезмерное упрощение функционального описания отдельных устройств, очевидно, не позволит найти адекватные ответы на поставленные вопросы оптимизации состава энергоустановки, определения рациональных режимов работы отдельных устройств и установки в целом.

Исходя из изложенного, выбор функционального описания устройств энергоустановки определялся основными целями моделирования:

- минимизация мощности первичных источников энергии, необходимой для обеспечения работы нагрузки;
- оптимизация состава первичных источников энергии для различных географических точек и параметрах метеогода;
- получение оценок требуемой (минимальной) совокупной массы и стоимости установки и отдельных устройств;
- получение оценок и зависимостей параметров устройств энергоустановки от режимов потребления мощности нагрузкой (нагрузками); формулирование рационального режима нагрузки;
- получение оценок рациональных параметров устройств для различных географических регионов, выявление наиболее критичных показателей устройств;
- отработка вариантов алгоритма управления режимами работы устройств энергоустановки;
- сопоставление технико-экономических показателей установки при различных ее конфигурациях и т. д.

Функциональные модели устройств должны быть достаточно простыми и в то же время должны правильно описывать качественную картину формирования показателей оптимизации при относительно небольших

количественных погрешностях. Модели должны быть интерактивными: они должны обеспечивать ввод новых значений основных технологических параметров, связанных с появлением более совершенных устройств или с определением достижимых характеристик при изменении того или иного параметра.

Исходя из целей моделирования, описания отдельных устройств должны содержать основные мощностные, энергетические, массогабаритные и стоимостные показатели, а также показатели эффективности (КПД) и потерь энергии, позволяющие проводить соответствующий анализ и оптимизацию, а также параметры метеогода для различных географических районов и режима нагрузки, которые, очевидно, оказывают, наряду с технологическими параметрами устройств энергоустановки, решающее влияние на результаты оптимизации. Другие характеристики устройств, например, уровни напряжения и тока, вольтамперные (при адекватном учете потерь энергии и мощности), температурные, нагрузочные зависимости и т. п. могут быть исключены из рассмотрения, по крайней мере, на первых этапах исследований на компьютерной модели, поскольку они не оказывают существенного влияния на принятые критерии оптимизации.

Для иллюстрации возможностей практического использования разрабатываемой модели приведем некоторые результаты предварительного сравнительного анализа возможности создания полностью автономных энергоустановок на базе использования фотоэлектрических и/или ветровых установок в реальных климатических условиях.

Рассмотрим следующие простейшие варианты конфигурации автономной энергоустановки. В качестве первичных источников энергии рассмотрим фотоэлектрическую батарею, ветроустановку или их комбинацию. В качестве системы аккумулирования и вторичных источников энергии выберем электрохимическую батарею и ее комбинацию с водородным накопителем. Для упрощения анализа рассмотрим возможность покрытия с помощью автономной энергоустановки постоянной в течение года нагрузки мощностью 1,55 кВт. Сравнение показателей энергоустановок проведем для климатических условий г. Павлодара.

Распределения среднедневных сумм солнечной радиации и среднедневных скорости ветра в течение года, характерные для данного места, приведены на рисунке 36.

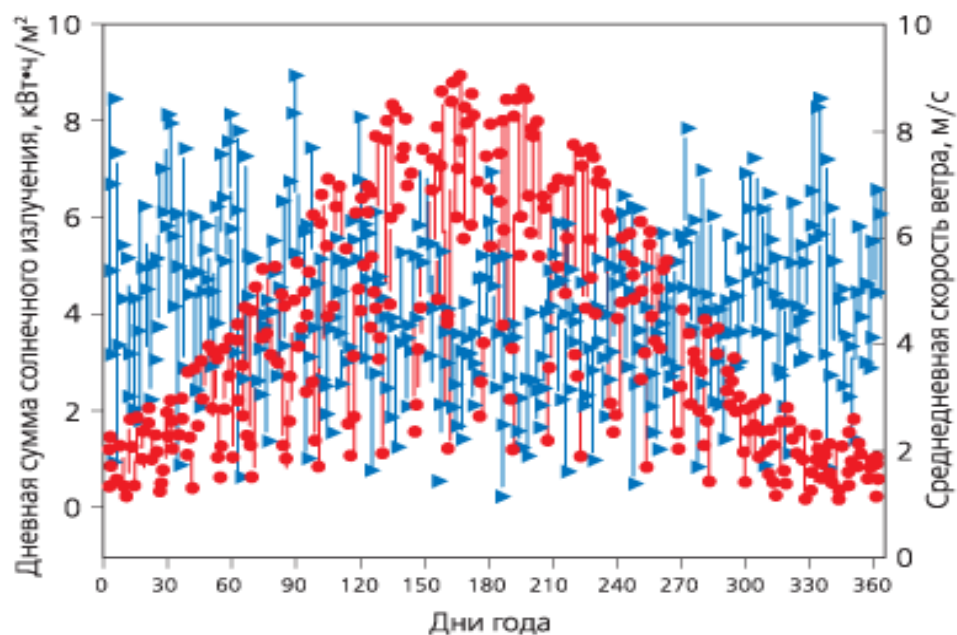


Рисунок 36 – Годовые средние распределения сумм солнечной радиации (красные) и скорости ветра (синие)

Видно, что средние суммы солнечной радиации имеют ярко выраженный максимум в летнее время, в то время как средняя скорость ветра в данном регионе имеет более равномерное распределение в течение года с некоторым снижением интенсивности в летний период.

На рисунке 37 представлены расчетные зависимости полной стоимости солнечно-водородной энергоустановки от годовой доли (s) покрытия нагрузки (1,55 кВт) и следующих четырех конфигураций энергоустановок:

- фотопреобразователь + аккумуляторная батарея (PV);
- ветроустановка + аккумуляторная батарея (Wind);
- фотопреобразователь + ветроустановка + аккумуляторная батарея (PV + Wind);
- фотопреобразователь + ветроустановка + аккумуляторная батарея + водородный накопитель (PV + Wind + H₂).

Представленные кривые соответствуют оптимальной комбинации мощности первичного источника и емкости аккумуляторной батареи, при которых стоимость установки для заданной доли покрытия годовой нагрузки минимальна.

Расчетные исследования проводились для следующих исходных данных.

Фотопреобразователи: КПД – 15 %, удельная стоимость – 5 долл. США за пиковый Вт (при облученности 1 000 Вт/м²), угол наклона к горизонту равен широте местности, ориентация – южная, затенение отсутствует.

Ветроустановка: удельная стоимость – 2 500 долл. США за кВт (при скорости ветра 9 м/с), минимальная рабочая скорость ветра – 3 м/с, в диапазоне скоростей ветра 3–9 м/с кубическая зависимость генерируемой мощности от

скорости ветра, при скорости ветра более 9 м/с генерируемая мощность возрастает.

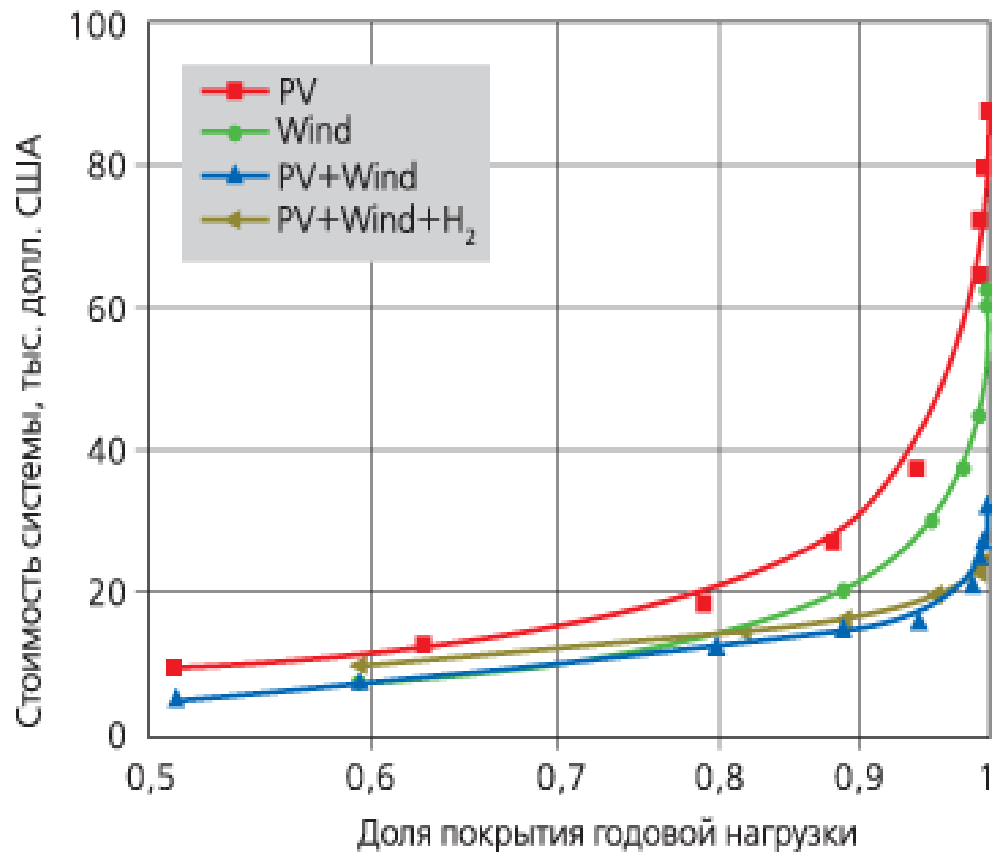


Рисунок 37 – Зависимость стоимости автономной энергоустановки от доли покрытия годовой нагрузки

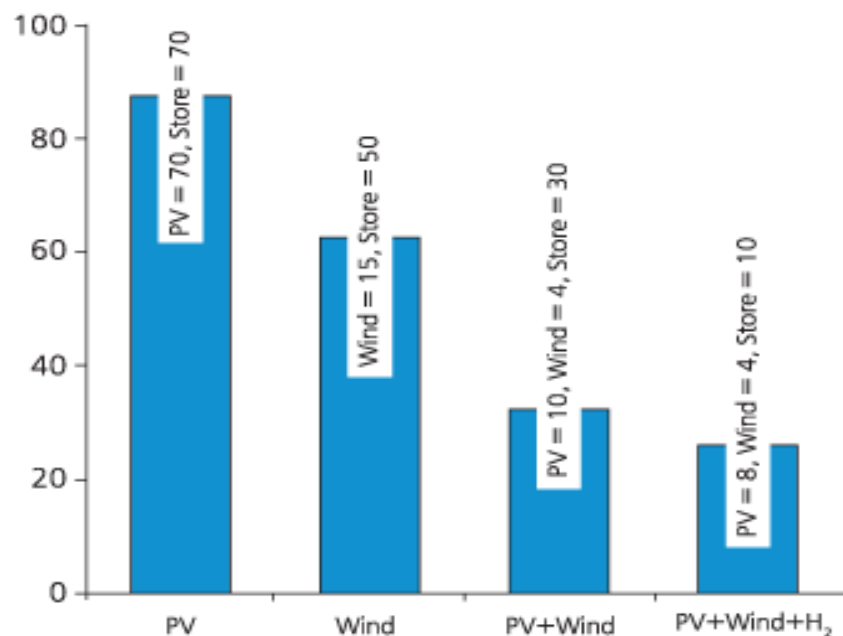


Рисунок 38 – Стоимость и параметры полностью автономных энергоустановок, обеспечивающих 100 % покрытие годовой нагрузки

Электрохимический аккумулятор: КПД – 95 %, саморазряд – 0,1 % в час, удельная стоимость – 500 долл. США за 1 кВт·ч емкости.

Предполагалось, что водородный накопитель суммарной стоимостью 2 500 долл. США (перспектива) включает в себя электролизер с удельной производительностью по водороду – $0,28 \text{ м}^3/\text{кВт}$ и максимальной производительностью до 1 м^3 водорода в час, батарею топливных элементов с удельным расходом водорода – $0,5 \text{ м}^3/\text{кВт}$, максимальной мощностью до 1 кВт и коэффициентом собственных нужд в ждущем режиме – 1 %, ресиверы водорода и кислорода (без утечек газов) соответственно емкостью 15 и $7,5 \text{ м}^3$. КПД согласующих преобразователей, входящих в состав водородного накопителя – 95 %. Оптимизационных расчетов по обоснованию его оптимальной конфигурации (мощности электролизера, батареи топливных элементов и объемов ресиверов) на данном этапе не проводилось. Водородный накопитель описанного состава включался в рассматриваемые варианты автономных энергоустановок как единое целое.

Видно, что с ростом годовой доли покрытия нагрузки стоимость установок растет, что обусловлено необходимостью увеличения как номинальной мощности первичных источников энергии, так и емкости системы аккумулирования энергии, причем темп роста стоимости возрастает с ростом доли покрытия нагрузки. Точки пересечения кривых с правой вертикальной осью соответствуют 100 % покрытию годовой нагрузки, т. е. такие установки являются полностью автономными, и в течение года не требуется использования каких-либо дополнительных источников энергии.

На рисунке 38 приведены результаты расчета стоимости и оптимальных параметров полностью автономных энергоустановок ($D = 100 \%$) для рассмотренных климатических условий.

Наиболее дорогим оказывается первый вариант, в котором в качестве первичного источника энергии используется лишь ФЭП. В этом случае в рассмотренных климатических условиях для гарантированного энергоснабжения нагрузки мощностью 1,55 кВт необходимо иметь батарею ФЭП площадью около 70 м^2 ($10,5 \text{ кВтпик}$) и аккумуляторную батарею емкостью около $70 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Во втором варианте при использовании в качестве первичного источника энергии только ветроустановки ее установленная мощность должна быть около 15 кВт, емкость аккумуляторной батареи по сравнению с первым вариантом может быть уменьшена до $50 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Комбинирование ФЭП с ветроустановкой обеспечивает синергетический эффект: расчетная стоимость установки по сравнению с первым вариантом снижается почти в три раза, с одновременным снижением потребной емкости аккумуляторной батареи до $30 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Установленные мощности первичных источников энергии могут быть также снижены ФЭП до 1,5 кВт, а ветроустановки до 4 кВт. Такой эффект объясняется тем, что солнечный и ветровой первичные источники удачно дополняют друг друга: в периоды, когда снижается солнечная радиация, усиливается ветер и наоборот (см. рис. 36). Включение в состав энергоустановки водородного накопителя (вариант 4) приводит к дополнительному снижению стоимости всей установки (при выбранной несколько оптимистической стоимости такого накопителя) и что более важно,

обеспечивает возможность уменьшения емкости электрохимической батареи до 10 кВт·ч, что в семь раз меньше, чем в первом варианте.

4.4 Выводы

Следует отметить, что представленные результаты расчетов носят предварительный характер. Однако на их основе можно сделать вывод о том, что применение солнечных и ветровых установок в качестве первичных источников энергии позволяет создать полностью автономные энергоустановки, обеспечивающие в различных климатических условиях гарантированное круглогодичное покрытие электрических нагрузок, по крайней мере, небольших потребителей. Наиболее эффективными представляются гибридные установки, оптимально (в зависимости от климатических условий) сочетающие солнечные и ветровые установки и источники энергии. Проблемы, связанные с чрезмерно большими аккумуляторами энергии на базе электрохимических батарей принципиально могут быть решены за счет применения комбинированных энергоустановок с водородными накопителями, обеспечивающими долгосрочное аккумулирование энергии и кардинальное снижение потребной емкости аккумуляторных батарей.

5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ФПС МОЩНОСТЬЮ 1,55 кВт, С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ПРОГРАММЫ-СИМУЛЯТОРА PVSYST Version

4.33

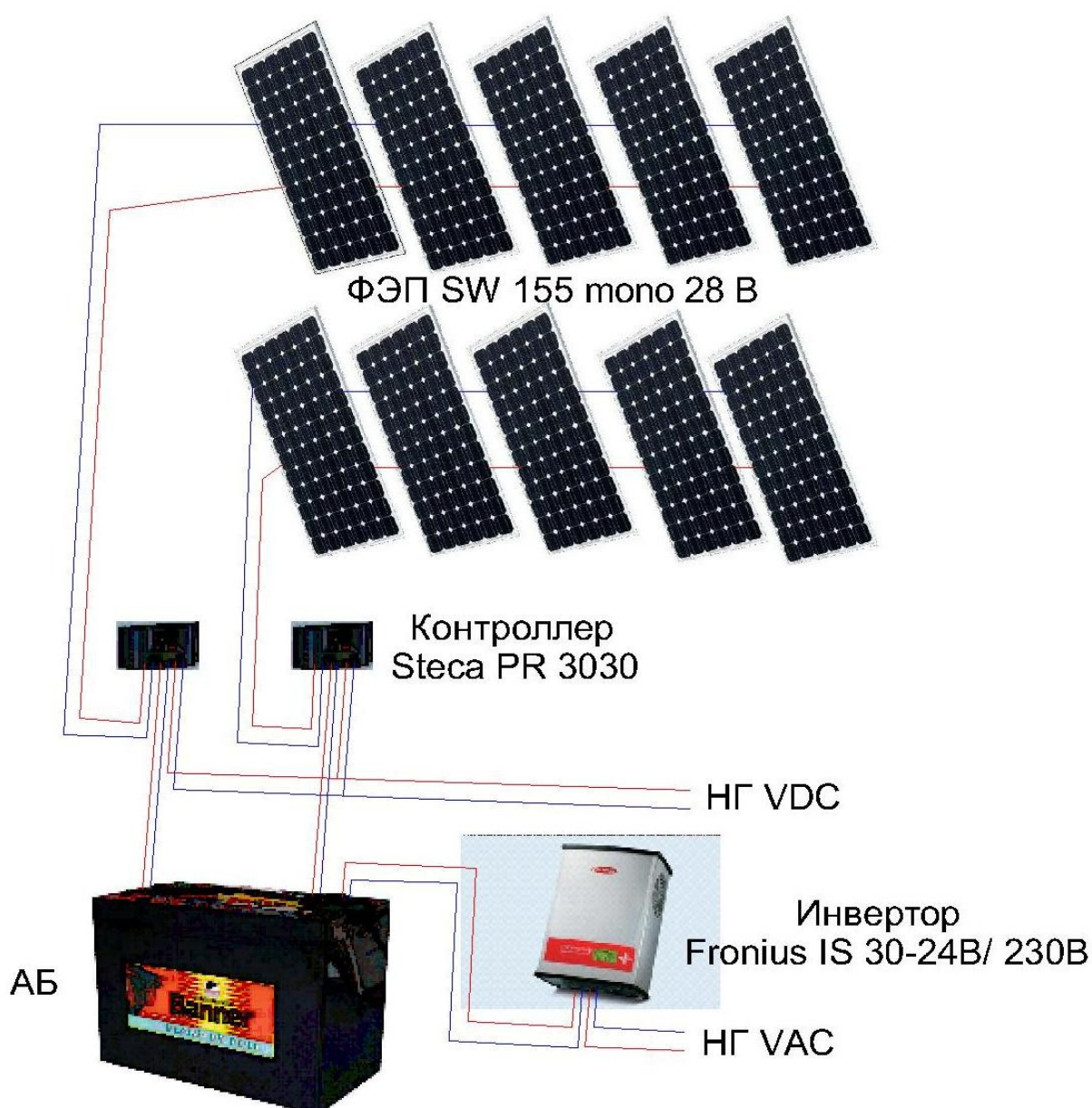


Рисунок 39 – Фотопреобразовательная система мощностью 1,55 кВт

Фотопреобразовательная система ФПС состоит из десяти ФЭП марки SW 155 mono, блока аккумуляторных батарей АКБ, двух контроллеров заряда, а также инвертора.

ФЭП соединены последовательно-параллельно, с целью добиться на выходе напряжения 24 В. Блок АКБ служит для хранения электрической энергии и использования ее в ночное время. АКБ соединены последовательно-параллельно, это необходимо для увеличения их емкости, а также для повышения напряжения до 24 В. Контроллера заряда служат для контроля уровня заряда АКБ и выходного напряжения с ФЭП. Инвертор предназначен для преобразования постоянного напряжения в переменное синусоидальное напряжение с частотой 50 Гц.

Для построения десяти ВАХ ФЭП, а также для нахождения действительной максимальной мощности ФЭП, использую специализированную программу симулятор PVSYST.

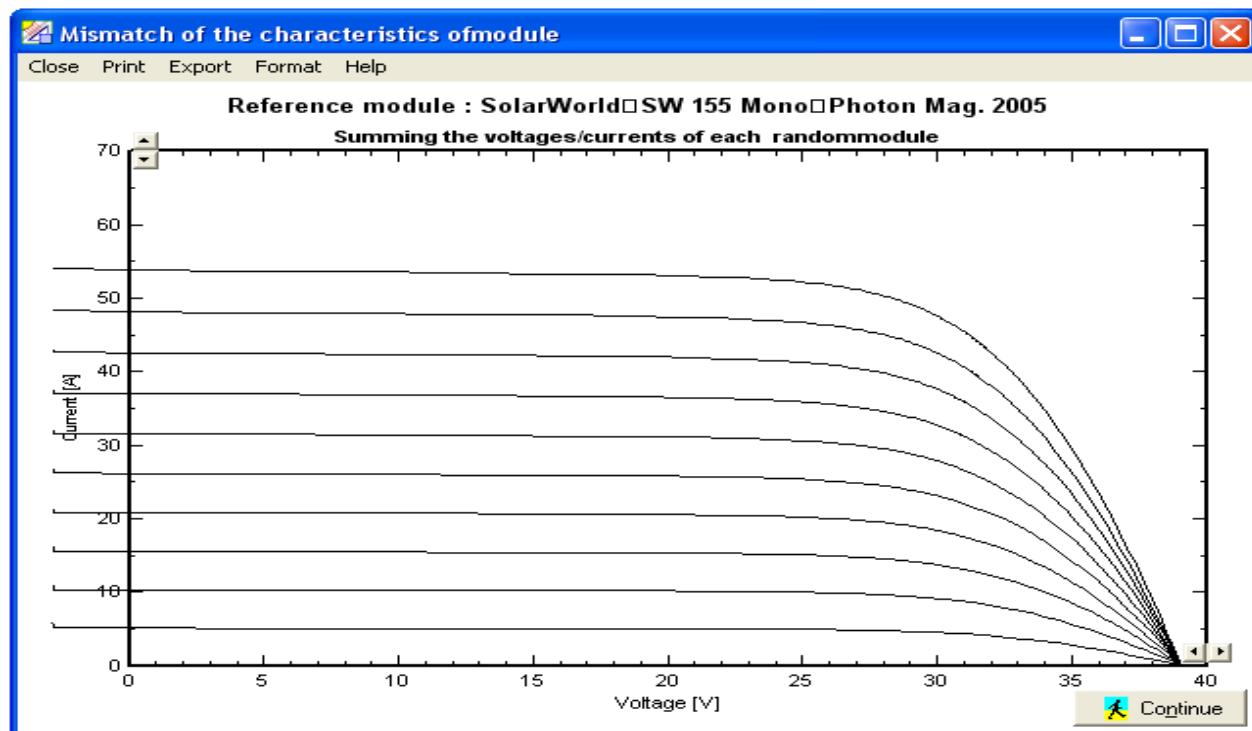


Рисунок 40 – ВАХ десяти ФЭП при 1000 Вт/м^2 номинальной мощностью 155 Вт

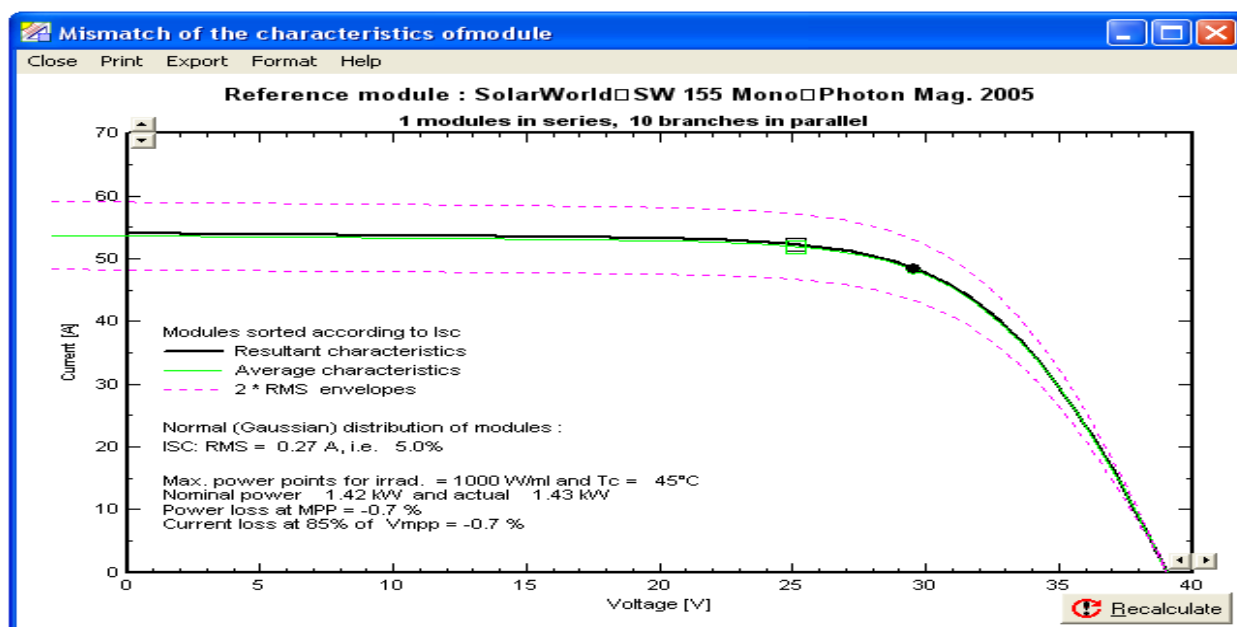


Рисунок 41 – Результирующая вольтамперная характеристика

Действительная максимальная мощность, снимаемая с десяти фотопреобразователей, при температуре ячеек 45°C и солнечной радиации в 1000 Вт/м^2 , составляет 1,43 кВт.

Программа строит ВАХ ФЭП с указанием максимально возможной выработки электроэнергии для каждого момента времени. Выбрав необходимый день, например 07.05.10, мы можем проследить, что через один час после восхода солнца, максимальная мощность составит 138 Вт, в 12 ч. 45 минут составляет уже 1437 Вт и в 18 часов вечера составит 377 Вт.

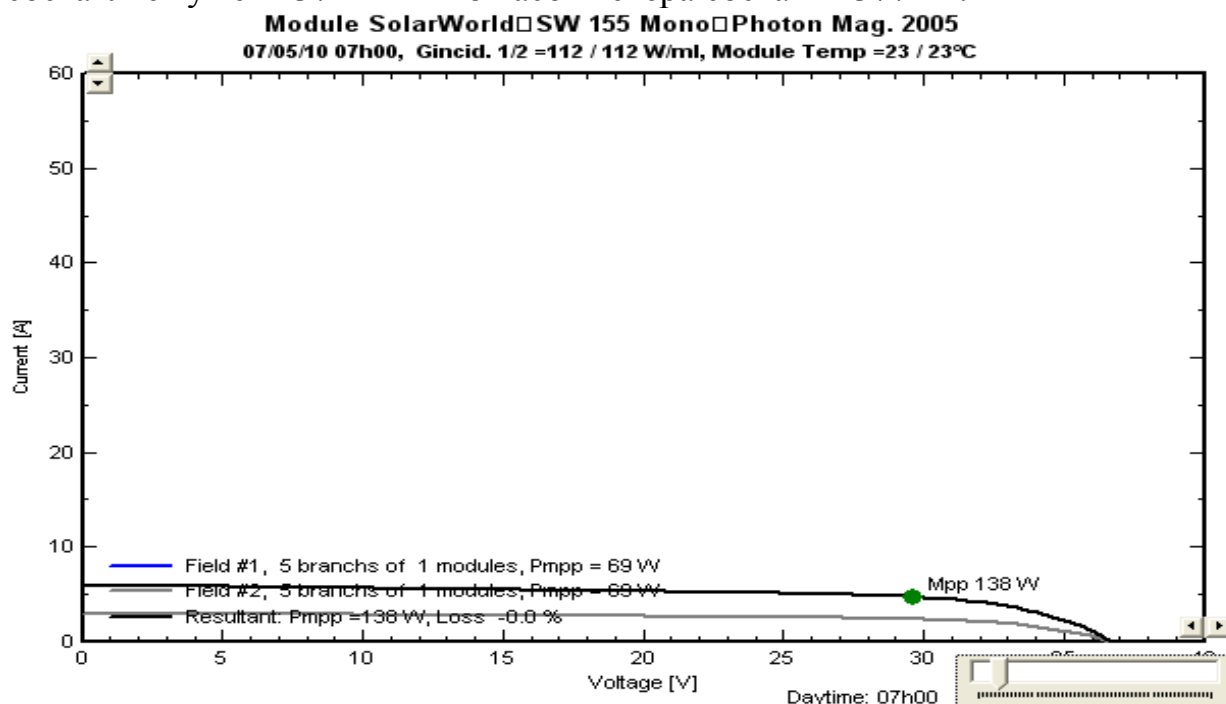


Рисунок 42 – Мощность ФПС через час после восхода солнца

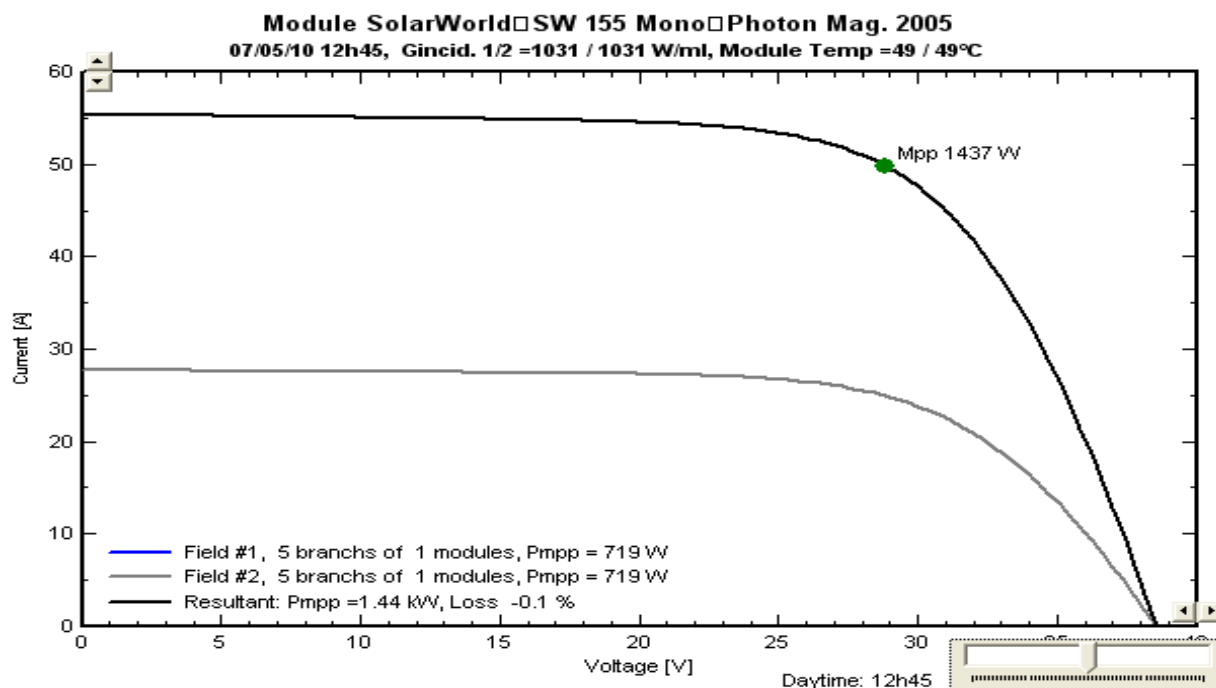


Рисунок 43 – Мощность ФПС в 12 часов 45 минут

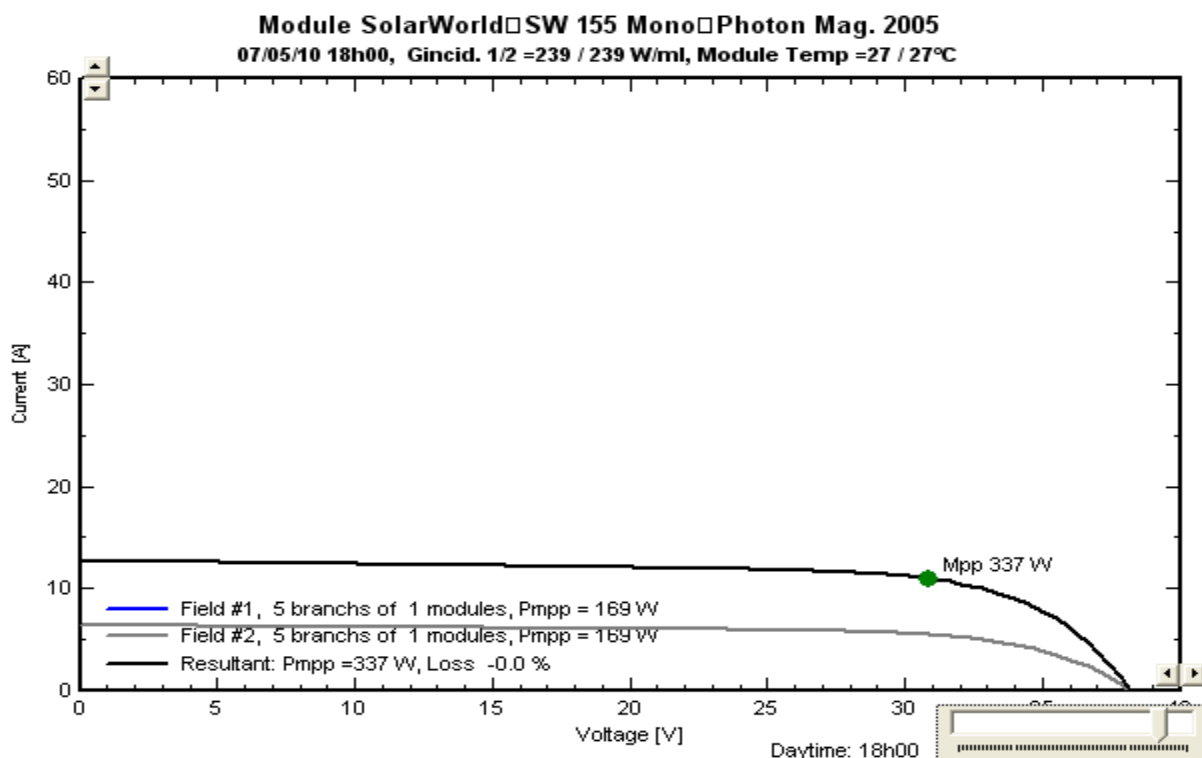


Рисунок 44 – Мощность ФПС в 18 часов вечера

Ориентация ФПС в пространстве является очень важным показателем вырабатываемой мощности. Мощность при различной ориентации ФПС сильно отличается. Для определения оптимальной ориентации, рассмотрим три различных варианта установки, а именно горизонтальной, вертикальной и под углом 45° .

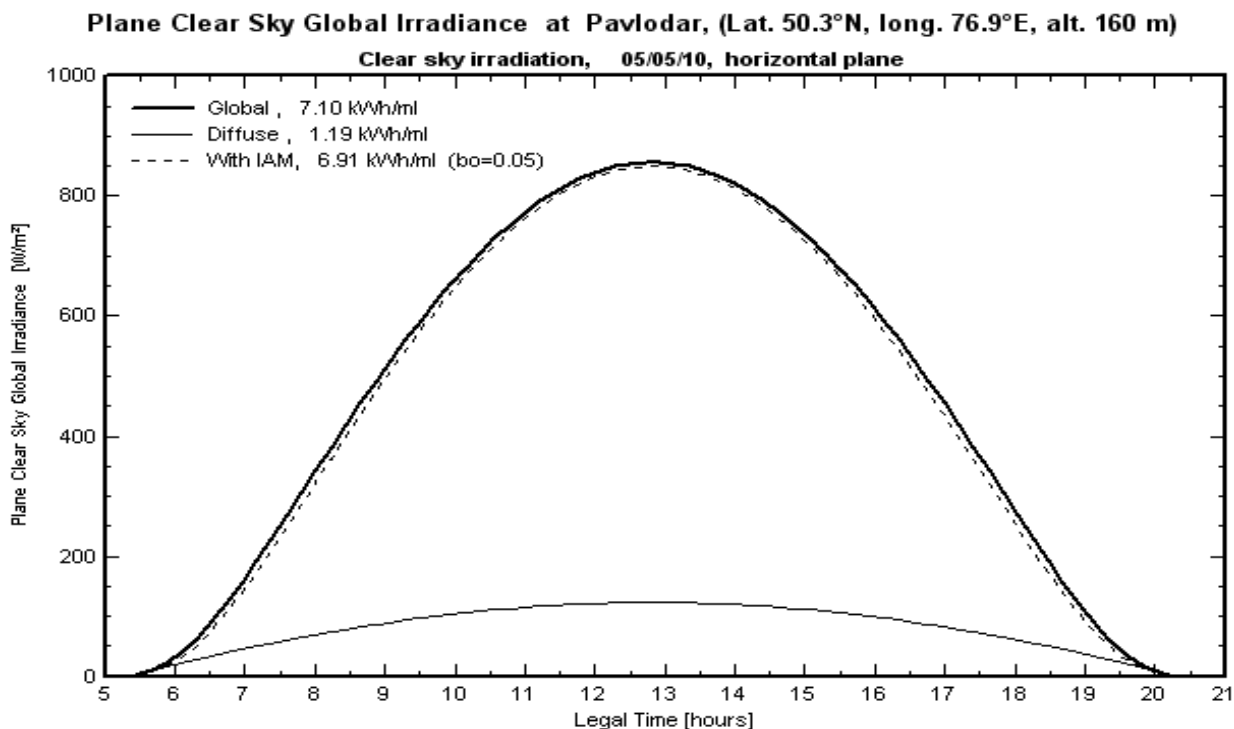


Рисунок 45 – Солнечная радиация, падающая на горизонтально расположенную поверхность

Полная солнечная радиация в течение дня (05.05.10) равна $7,10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, диффузная (рассеянная) радиация составляет $1,19 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. Максимальное значение солнечной радиации достигает значения $910 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Солнечный день длился 14,5 часов.

Определим годовую солнечную радиацию, падающую на горизонтальную поверхность, при нулевом азимуте.

System Specification

Array specification

Active area [m2]

Nominal Power [kWp]

Annual yield [MWh/year]

Power 1.55 kWp

More details

Collector plane orientation

Tilt 90° Azimuth 0°

West East

South

Yearly Meteo Yield

Transposition Factor FT 0.88

Loss by respect to optimum -27.7%

Global on coll. plane 1148 kWh/ml

Show Optimisation ?

Tilt [°] 90

Azimuth [°] 0

Cancel Next

Рисунок 46 – Определение годовой солнечной радиации, падающей на горизонтально расположенную поверхность при нулевом азимуте

Годовая солнечная радиация, падающая на горизонтально расположенную поверхность при нулевом азимуте равна 1148 кВт·ч/м².

Для ФПС номинальной мощностью 1,55 кВт установленной с горизонтальной ориентацией определяем выходные экономические показатели. А именно инвестиции и стоимость энергии за 1 кВт·ч.

Рассчитана зависимость между солнечной радиацией, и солнечной радиацией от фиксированной поверхности под углом. В весенне - летний период наблюдается пик солнечной радиации, падающей на горизонтально расположенную поверхность.

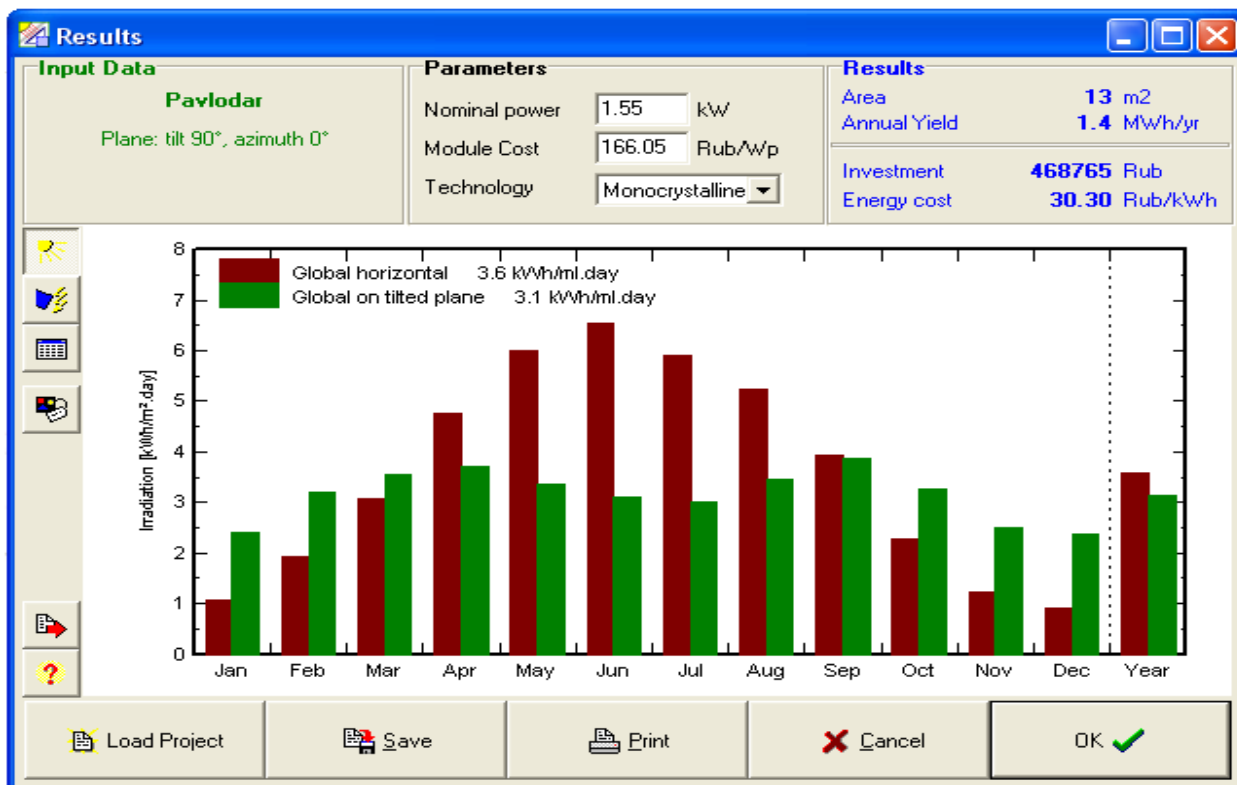


Рисунок 47 – Определение экономических показателей и диаграмма распределения солнечной радиации по месяцам

Инвестиционные вложения составляют 468 765 руб., а стоимость энергии за 1 кВт·ч составляет 30,30 руб.

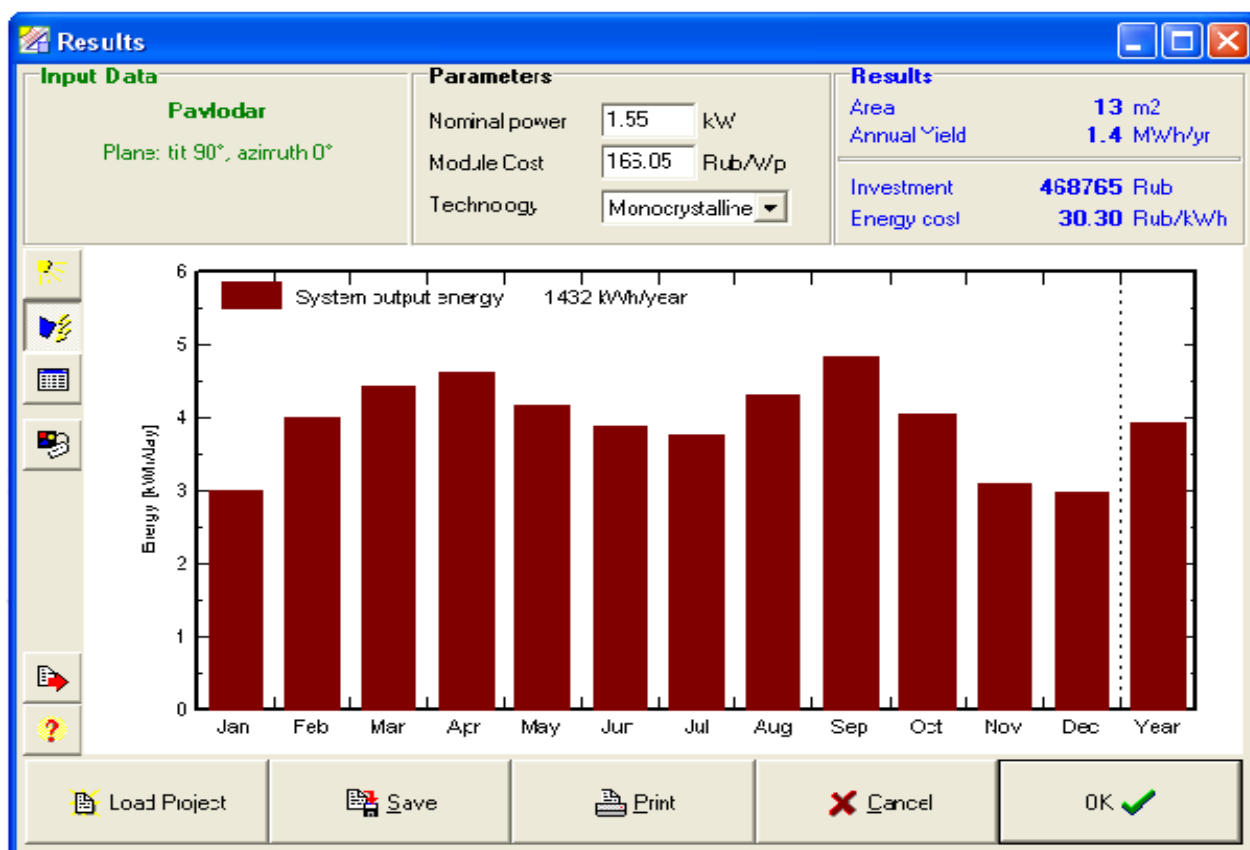


Рисунок 48 – График выработки выходной мощности ФПС

The screenshot shows the 'Results' window of a software application. It is divided into several sections:

- Input Data:** Project name 'Pavlodar', Plane: tilt 90°, azimuth 0°.
- Parameters:** Nominal power 1.55 kW, Module Cost 166.05 Rub/Wp, Technology Monocrystalline.
- Results:** Area 13 m², Annual Yield 1.4 MWh/yr, Investment 468765 Rub, Energy cost 30.30 Rub/kWh.
- Economic gross evaluation (excluding taxes and subsidies):**
 - Module cost: 257378 Rub
 - Supports cost: 57195 Rub
 - Inverter and wiring: 45756 Rub
 - Transport/Mounting: 108437 Rub
 - Total investment: 468765 Rub**
 - Annuities: 37615 Rub/yr
 - Maintenance costs: 5783 Rub/yr
 - Total Yearly cost: 43398 Rub/yr**
 - Energy cost: 30.30 Rub/kWh**
- Currency:** Russia, Rub.
- Loan:** Duration 20 years, Rate 5.0%, Ann. factor: 0.080.
- Footer:** Load Project, Save, Print, Cancel, OK buttons.

A red warning message states: 'These values should only be considered as an order of magnitude. More precise evaluations will be available with detailed simulation.'

Рисунок 49 – Экономические показатели: капиталовложения, чистые инвестиции, годовой взнос в счет амортизации, сумма выплат по кредиту, стоимость выработанной энергии.

5.1 Выводы

Все полученные данные сравниваем с показателями при вертикальном положении поверхности и ориентацией под углом 45° к горизонту. Полученные данные сводим в таблицу 8.

Таблица 8 – Сравнение вариантов

Ориентация	Годовая солнечная радиация, кВт·ч/м ²	Дневная солнечная радиация, кВт·ч/м ²	Выходная мощность ФПС, кВт·ч/год	Кап. вложения, руб.	Стоимость энергии, руб/кВт·ч
Горизонтальная (90°)	1148	3,6	1432	468765	3,6
Вертикальная (0°)	1230	3,9	1657	468765	3,6
45° к горизонту	1582	4,2	1974	468765	3,6

В ходе моделирования ФПС 1,55 кВт, установлено, что наилучший вариант установки такой системы является установка ФПС под углом 45° к горизонту. Фотопоглощающая способность и соответственно выходная мощность ФПС установленной под углом значительно выше чем в других рассматриваемых вариантах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Солнечная энергетика признана одним из наиболее перспективных видов альтернативной энергетики в мире. Из всех альтернативных источников энергия солнца является самой чистой и безопасной.

Несмотря на то, что Казахстан расположен на широтах между 42 и 55 градусами к северу, потенциал солнечной радиации на территории республики достаточно значителен и составляет 1300-1800 кВт·ч/м²·год. В связи с континентальным климатом, количество солнечных часов в году составляет 2200-3000. Наличие значительного потенциала солнечной энергии делает возможным его экономическое использование. В Казахстане есть все условия для развития солнечной энергетике. Есть промышленные запасы кварцевого сырья и других минералов, в том числе редкоземельных, необходимых для производства фотоэлементов - галлия, мышьяка, кадмия, германия.

С использованием нанотехнологий возможна организация в Казахстане крупномасштабного производства фотоэлектрических концентраторных модулей. Себестоимость одного ватта установленной мощности концентраторных модулей составит <250 тенге/Вт, т.е. будет снижена приблизительно в два раза по сравнению с существующим мировым уровнем (в ценах 2009 года). Использование концентраторных солнечных энергоустановок в районах без централизованного электроснабжения позволит сделать эти места пригодными для цивилизованной жизни человека.

Из результатов исследования ФЭП следует, что при солнечной интенсивности в 850 Вт/м² ВАХ ФЭП имеет почти идеальный характер, т.е. графическая зависимость. Что нельзя сказать о ВАХ ФЭП с солнечной интенсивностью в 100 Вт/м². Ее характеристика имеет линейную зависимость.

Рассмотрев комбинированную солнечно-ветровую систему электроснабжения, можно сделать вывод о реальных перспективах её применения.

Она практически не имеет минусов. Главный и единственный её минус – высокая цена, которая, в конечном итоге, оправдывает себя через несколько лет. Цена на электрическую энергию растет каждый месяц, поэтому проект оправдает себя на много раньше. Но с другой стороны, вложив деньги один раз, можно многие годы обеспечивать себя качественным электричеством и, ни от кого не зависеть. Тем более что технические параметры и характеристики используемого оборудования позволяют эксплуатировать их долгие годы, без какого-либо обслуживания.

Возможность совмещения ветрогенератора и солнечных панелей обеспечивает бесперебойное надежное электроснабжение, т.к. во время полного безветрия всегда светит Солнце и, наоборот, в пасмурные дни дует ветер, достаточный для работы ветрогенератора.

Данная система электроснабжения не нарушает экологическую обстановку в регионе, потому что нет никаких вредных выбросов в атмосферу.

В Инновационном Евразийском Университете подобный проект реализован и работает по сегодняшний день, целью которого является электроснабжение

компьютерных серверов и АТС.

Представленные результаты расчетов автономных энергоустановок носят предварительный характер. Однако на их основе можно сделать вывод о том, что применение солнечных и ветровых установок в качестве первичных источников энергии позволяет создать полностью автономные энергоустановки, обеспечивающие в различных климатических условиях гарантированное круглогодичное покрытие электрических нагрузок, по крайней мере, небольших потребителей. Наиболее эффективными представляются гибридные установки, оптимально (в зависимости от климатических условий) сочетающие солнечные и ветровые установки и источники энергии. Проблемы, связанные с чрезмерно большими аккумуляторами энергии на базе электрохимических батарей принципиально могут быть решены за счет применения комбинированных энергоустановок с водородными накопителями, обеспечивающими долгосрочное аккумулирование энергии и кардинальное снижение потребной емкости аккумуляторных батарей.

В ходе моделирования ФПС 1,55 кВт, установлено, что наилучший вариант установки такой системы является установка ФПС под углом 45° к горизонту. Фотопоглощающая способность и соответственно выходная мощность ФПС установленной под углом значительно выше чем в других рассматриваемых вариантах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 В.Д. Румянцев. "Приоритетные исследования и разработки в области фотоэлектрического преобразования солнечной энергии" Тел.: +7-812-292 7394, e-mail: ramyan@scell.ioffe.ru
- 2 В.Ю. Мельников, Д.В. Мосияш, Р.Ж. Альназаров, Е.В. Зигангирова. Инновационный Евразийский университет, г. Павлодар, "Определение солнечного потенциала для северных регионов Казахстана"// Творчество молодых - инновационному развитию Казахстана: Материалы IX Респ. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, 22-24 апреля 2010 г. - Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2010 г.
- 3 Н.В. Харченко. Индивидуальные солнечные установки. - Энергоатомиздат, 1991
- 4 Закон Республики Казахстан от 25 декабря 1997 г. N 210-1 "Об энергосбережении"
- 5 Ежедневная общественно-политическая республиканская газета "Экспресс-Казахстан" от 7 июня 2008 г. №104
- 6 "Городская неделя" от 10 сентября 2008г. Газета поставлена на учет в Министерстве информации и общественного согласия Республики Казахстан. 6.11.2001г. Свидетельство №2443-Г
- 7 А.Х. Тлеуов, И.А. Пястолова, А.А. Тлеуова. Казахский государственный агротехнический университет, г. Астана, "Прогнозирование поступления солнечной радиации"// Вестник Челябинского государственного агроинженерного университета. Т. 47. с. 117-120. 2006 г.
- 8 Специализированная программа-симулятор фотопреобразовательных систем PVSYST, www.pvsyst.com
- 9 Вестник Союза инженеров-энергетиков РК "Энергетика", 2008, № 2(25), стр. 72, www.kazenergy.kz
- 10 Журнал Sun & Wind Energy 2/2009
- 11 М.В. Солонович, Д.В. Мосияш, Е.В. Зигангирова, Инновационный Евразийский университет, г. Павлодар, "Возможности использования фотоэлектрических преобразователей в г.Павлодар"// Творчество молодых - инновационному развитию Казахстана: Материалы IX Респ. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, 22-24 апреля 2009 г. - Усть-Каменогорск: ВКГТУ, 2009. - 4.V. - 286 с. С. 68-69.
- 12 John Twidell & Tony Weir. Renewable energy resources. Second edition.. 2008
- 13 Petros I. Axaopoulos. Experimental exercises on Solar and Wind Energy. Athens 2009. – 119 с.
- 14 www.thenews.kz
- 15 www.biorosinfo.ru
- 16 Chemical Journal, РосБизнесКонсалтинг «Рынок фотовольтаики – солнечные батареи», <http://research.rbc.ru>
- 17 Брянцев В.А. «Солнечные батареи» из слайд-лекции, прочитанной в Гринпис 11 февраля 2009 г.; <http://www.306.ru/netrad.htm>

- 18 М.А. Сутягинский. «Использование естественных преимуществ территорий – эффективные региональные стратегии», 7 октября 2009 г., msut@duma.gov.ru
- 19 Б. Мукашев, академик, лауреат Государственной премии Республики Казахстан, www.liter.kz
- 20 В.А. Агеев. «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», Кафедра теплоэнергетических систем, 2004 г.
- 21 В.М.Андреев, В.А.Гриликес, В.Д.Румянцев «Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения (монография)», изд-во «Наука», 1989
- 22 V. M. Andreev, V. A. Grilikhes, V. D. Rumyantsev, *Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight* (Published by John Wiley & Sons Ltd), 1997.
- 23 Ж.И.Алферов, В.М.Андреев, В.Д.Румянцев «Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики», «Физика и техника полупроводников, том 38, вып. 8, 2004, стр. 937-948.
- 24 Zh.I.Alferov, V.M.Andreev, V.D.Rumyantsev "III-V heterostructures in photovoltaics" in: "Concentrator Photovoltaics", Eds.: A.Luque, V.Andreev, Springer Series in Optical Sciences, vol.130, 2007, pp. 25-50.
- 25 В.М.Лантратов, Н.А.Калюжный, С.А.Минтаиров, Н.Х.Тимошина, М.З.Шварц, В.М.Андреев «Высокоэффективные двухпереходные GaInP/GaAs солнечные элементы, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии», ФТП, том 41, вып. 6, 2007, стр. 751-755
- 26 Ж.И.Алферов, В.М.Андреев, В.Д.Румянцев и др. Патент РФ на полезную модель №47497 «Солнечная фотоэлектрическая установка» Дата приоритета от 22.02.2005 г.
- 27 Ж.И.Алферов, В.М.Андреев, В.Д.Румянцев. Патент РФ на изобретение №2286517 «Солнечная фотоэлектрическая установка» Дата приоритета от 21.02.2005 г.
- 28 В.М. Андреев, В.А. Гриликес, В.Д. Румянцев. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. - Л.: Наука, 1989. -310 с.
- 29 В.М. Андреев. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии. // Соросовский образовательный журнал. - 1996. - №7. - С. 93-98.
- 30 В.М.Андреев, В.Р.Ларионов, И.В.Ловыгин, Д.А.Малевский, М.Я.Маслеников, В.Р.Румянцев, М.З.Шварц. ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ЗАО «Техноэксан»
- 31 Б. Бринкворт. Солнечная энергия для человека. Пер. с англ. В.Н. Оглоблева. Под ред. и предисл. Б.В. Тарнижевского. - М.: Мир, 1976. - 291 с.
- 32 М. Мейтин. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы.
- 33 О.Н. Фаворский. Установки для непосредственного преобразования тепловой энергии в электрическую. - М.: Высшая школа, 1965. - 288 с.
- 34 www.ecomuseum.kz
- 35 www.stecasolar.de
- 36 www.fronius.com
- 37 www.solarworld.de
- 38 www.zephyreca.co.jp
- 39 R.Gasch, J.Twele. Wind Power Plants. 2002. – 389 с.

- 40 Detlef Schulz. Grid integration of wind energy systems. Helmut-Schmidt-University. 2008.
- 41 В.Ю. Мельников, Д.В. Мосияш, А.С. Ермензин. Оценка ветрового потенциала в условиях города Павлодара. Павлодар: ИнЕУ, 2009 – Т.1 – 244 с.
- 42 Шкаф автоматического ввода резерва (АВР), ООО «Электрощит» г. Москва.
- 43 Д.В. Мосияш, А.С. Ермензин, Р.Ж.Альназаров, «Гибридная система электроснабжения на основе возобновляемых источников», Второй республиканский конкурс проектов по энергосбережению и альтернативным источникам энергии среди учащихся, студентов, молодых специалистов и ученых», г. Алматы, 2010 г., 2 том, с.70-71
- 44 Научно-прикладной справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1990–по настоящее время.
- 45 The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set .
- 46 Специализированная программа TRNSYS 16 – The Transient System Simulation Program.
- 47 Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison, www.sel.me.wisc.edu/trnsys
- 48 Transsolar Energietechnik GmbH, www.transsolar.com
- 49 CSTB – Centre Scientifique et Technique du Batiment, <http://software.cstb.fr>
- 50 TESS – Thermal Energy Sustems Specialists, <http://tess-inc.com>