

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАНА  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА  
ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА**

На правах рукописи  
УДК 621.472; 621.383.56

**АХТАМОВ ТОХИР ЗУХРИДДИН ЎҒЛИ**

**РАЗРАБОТКА ФОТОТЕПЛОВЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ СЕЛЬСКИХ  
РЕГИОНОВ**

5A140203 - «Гелиофизика и использование солнечной энергии»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание академической степени магистра физики

**Научный руководитель:**

д.т.н.: Турсунов М. Н.

**Научный консультант:**

д.т.н., проф.: Мирсаатов Р. М.

**Ташкент – 2018**

Диссертационная работа рекомендуется к защите

Декан физического факультета

Заведующий кафедрой физики  
полупроводников и полимеров

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

## **АННОТАЦИЯ**

Ресурсы ископаемых видов топлива расходуются высокими темпами. Уже в этом столетии их дефицит может существенно сказаться на жизни людей, в связи с этим в качестве альтернативы особое внимание будет уделено возобновляемым источникам энергии (ВИЭ).

В фотоэлектрической установке для выработки электроэнергии используется только часть приходящей солнечной радиации, остальная – рассеивается в виде теплоты в окружающее пространство. Проблема более полного использования энергии приходящего солнечного излучения решается путём комбинирования фотоэлектрических батарей (ФЭБ) и солнечных коллекторов (СК) в одно технологическое устройство. Разработана технология фото тепловой батареи и установки на их основе, позволяющая увеличение эффективности преобразования солнечной энергии на 25-30 % по сравнению с ФЭБ традиционной конструкции, а также горячей воды с температурой 40-50 °С. Исследованы параметры фото тепловых батарей в условиях солнечного освещения и показано возможность использования в сельских регионах республики.

## **ANNOTATION**

Resources of fossil fuels are consumed at high rates. Already in this century, their deficit can significantly affect the lives of people, in this regard, as an alternative, special attention will be paid to renewable energy sources.

In a photovoltaic system, only part of the incoming solar radiation is used to generate electricity, the rest is dissipated as heat into the surrounding space. The problem of more full utilization of the energy of incoming solar radiation is solved by combining photovoltaic batteries (FB) and solar collectors (SC) into one technological structure. The technology of photothermal battery and installation based on them has been developed, which makes it possible to increase the efficiency of the conversion of solar energy by 25-30% in comparison with the FB of the traditional design, as well as hot water with a temperature of 40-50 °C. The parameters of the photothermal batteries under conditions of solar illumination are investigated and it shows the possibility of use in rural regions of the republic.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ. . . . .</b>	<b>3</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ. . . . .</b>	<b>4</b>
<b>I. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ БАТАРЕИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В УСЛОВИЯХ УЗБЕКИСТАНА (КРАТКИЙ ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР) . . . . .</b>	<b>7</b>
1.1. Элементы теории фотоэлектрических преобразователей . . . . .	8
1.2. Технология изготовления фотоэлектрических батарей на основе кристаллического кремния . . . . .	15
1.2.1. Технология изготовления фотоэлектрической батареи. . . . .	19
1.2.2. Применение фотоэлектрических батарей в условиях Узбекистана. . . . .	26
1.3. Методы повышения эффективности фотоэлектрических батарей	30
1.4. Выводы . . . . .	33
<b>II. ФОТО ТЕПЛОВЫЕ БАТАРЕИ – ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ . . . . .</b>	<b>34</b>
2.1. Конструкция и технология изготовления фото тепловых батарей	34
2.2. Переносная фото тепловая установка и ее эксплуатационные параметры . . . . .	38
2.3. Повышение эффективности работы фото тепло преобразовательной установки . . . . .	44
2.4. Выводы . . . . .	48
<b>III. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТО ТЕПЛОВЫХ БАТАРЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ПАРАМЕТРЫ . . . . .</b>	<b>49</b>
3.1. Методика измерения параметров фото тепловых батарей . . . . .	49
3.2. Испытания фото тепловых батарей в условиях солнечного освещения . . . . .	50

3.3.	Влияние климатических условий на эффективность работы фото тепловых батарей . . . . .	52
3.4	Исследование свойств фото тепловых батарей повышенной эффективности с полным тепловым контактом . . . . .	65
3.5	Комбинированная система ФТБ – ЭВН для обеспечения горячей водой и электроэнергией сельских домохозяйств . . . . .	74
3.6.	Выводы. . . . .	76
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .</b>		<b>78</b>
<b>СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ. . . . .</b>		<b>80</b>
<b>СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА. . . . .</b>		<b>86</b>

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- СЭ** – солнечный элемент;
- ФЭБ** – фотоэлектрическая батарея;
- ФТБ** – фото тепловая батарея;
- ФЭМ** – фотоэлектрический модуль;
- ФТПБ** – фото тепло преобразовательная батарея;
- СК** – солнечный коллектор;
- АБ** – аккумуляторная батарея;
- ВАХ** – вольт- амперная характеристика;
- КПД** – коэффициент полезного действия;
- СЭС** – солнечные электрические станции;
- ФЭС** – фотоэлектрические системы;
- ФЭУ** – фотоэлектрическая установка;
- АСЭ** – автономные системы энергоснабжения;

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы:** В настоящее время встает вопрос о выработке большего количества электроэнергии в связи с увеличением её потребности у человечества. Получение электроэнергии осуществляется в основном за счет тепловой энергетики, на её долю выпадает почти 85% производства всей электроэнергии в мире.

Общие установленные мощности в конце 2016 года в мире достигла значения 300 ГВт. Основным материалом при производстве СЭ остается кремний. СЭ из кристаллического кремния с р-п переходом по-прежнему занимают ведущее положение в фотоэлектрической энергетике. 95 % всех СЭС в мире изготавливается из кремния. Минимальная стоимость фотоэлектрических батарей из кремния на оптовом европейском рынке составляет менее 1000 евро/кВт, на американском рынке 1100 доллар/кВт. Использование фотоэлектрических систем (ФЭС) в мире растут высокими темпами. Например, в США использование ФЭС в период с 2003 по 2008 год возросло на 50 %, с ростом использования более остро встали и проблемы долгосрочной эксплуатации ФЭС. Ученые прогнозируют ежегодный рост ФЭС не менее 25% использования солнечной энергии как не иссякаемого источника, не разрушающего окружающую среду и не угрожающего будущим поколениям жителей Земли.

**Объектом и предметом исследования** является разработанная переносная фото-тепловая преобразовательная установка для обеспечения энергией и горячей водой, не обустроенные полевые станы сельских жителей регионов республики для создания комфортных условий. Эффективность работы установки увеличено 1,7 - 2,0 раз из-за возможности использования концентрирующей системы.

**Цель и задачи исследования** является разработка комбинированных энергетических установок на основе фотоэлектрических батарей с

встроенным тепловым коллектором с оптимальными параметрами для прямого и отраженного солнечного излучения предназначенных для условий жаркого климата.

**Основными задачами диссертационной работы являлось:**

- Разработка опытных образцов фотоэлектрической батареи с устройством охлаждения для климатических условий Узбекистана;
- Проведение мониторинга измерения эффективности преобразования фотоэлектрической батареи с учетом воздействия климатических и эксплуатационных факторов;
- изготовление опытных образцов переносных вариантов фото тепловых батарей и изучение эксплуатационных параметров в естественных условиях;

**Научно-практическая ценность работы** разработана конструкция фотоэлектрической батареи дополнительными солнечными элементами адаптированная к условиям жаркого климата; разработана новая конструкция фото тепловой установки с тепловым коллектором на основе полимерных трубок, которое увеличивают электрическую мощность 1,5-1,6 раз (с 18 до 28 %).

**Публикации:** По материалам диссертации опубликовано 4 работы.

**Структура и объем диссертации:** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 86 страниц машинописного текста, включающего 30 рисунков, 1 схема ФП, 1 таблица, 14 графиков и список цитированной литературы из 62 наименований.

**Первая глава** содержит краткий обзор литературных данных, посвященных вопросам теории фотоэлектрических преобразователей, технологии изготовления ФЭБ на основе кристаллического, особенностям применения ФЭБ в условиях Узбекистана, методам повышения эффективности ФЭБ в условиях жаркого климата и постановка задачи магистерской диссертации.



**Во второй главе** приведена конструкция и технология изготовления фото тепловых батарей, переносная фото тепловая батарея и её параметры, возможности повышения эффективности работы фото тепловой установки и выводы по 2 главе.

**В третьей главе** приведена технология изготовления фото тепловой батареи повышенной эффективности, в том числе; методика измерения и испытания параметров ФТБ в натурных условиях солнечного освещения, влияние климатических условий на эффективность работы ФТБ, разработка ФТБ с полным тепловым контактом, комбинированная система ФТБ-ЭВН и выводы.

# **І ГЛАВА**

## **ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ БАТАРЕИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В УСЛОВИЯХ УЗБЕКИСТАНА**

*(Краткий литературный обзор)*

Впервые энергия солнечного излучения преобразована в электрическую энергию с достаточно высоким КПД с помощью полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей (ФП).

Солнечные батареи доказали свою незаменимость, высокую надежность и долговечность при работе на борту космических аппаратов, особенно после того, как удалось в какой-то мере защитить их от неблагоприятного воздействия окружающей среды /3-4/.

Начались успешные испытания солнечных батарей на Земле, изучение параметров и ресурса батарей при эксплуатации в тяжелых климатических условиях, поиски оптимальных конструктивных решений, выбор лучших герметизирующих и светостойких материалов, изолирующих от окружающей среды тонкие, хрупкие полупроводниковые кристаллы, пленки и ленты, из которых получают сейчас элементы для наземного применения. И здесь учеными разных стран получены обнадеживающие результаты /1-2/. На территории стран СНГ работают сотни фотоэлектрических станций (СФЭС), бесперебойно снабжающих электроэнергией речные бакены, сигнальные огни, системы аварийной связи и многие другие объекты, расположенные в районах труднодоступных для доставки топлива и энергоснабжения. В ряде ближневосточных стран (например, в Иордании) ФЭК используются для энергопитания водоподъемных агрегатов, узлов радио и радиотелефонной связи, освещения и питания маломощных бытовых энергопотребителей.

Электрическую мощность от 100 до 200 Вт можно получить с 1 м<sup>2</sup> современных солнечных батарей на ярком свете, и при этом не происходит никакого загрязнения окружающей среды вредными химическими веществами, отработанный теплотой и пр. /5-6/ Значительные результаты достигнуты сейчас не только при практическом использовании солнечной энергии, но и в разработке теоретических основ прямого преобразования солнечной энергии.

Преобразование энергии современных солнечных элементов с высоким КПД основано на фотовольтаическом эффекте, который возникает в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. Ниже рассматриваются в сжатой форме основные закономерности физических процессов, определяющих работу ФП /7, 8/.

### **1.1. Элементы теории фотоэлектрических преобразователей.**

Эффективность преобразования световой энергии при помощи ФП определяется количеством образованных носителей тока при поглощении кванта света из области спектральной чувствительности ФП и характеризуется величиной, называемой эффективным квантовым выходом ФП, и обозначаемой  $Q_{эфф}$ .

$$Q_{эфф} = \frac{I_{кз}}{N_0} \quad (1.1)$$

где  $N_0$  – общее число падающих фотонов,  $I_{кз}$  – ток короткого замыкания ФП (электрон/сек). Эффективный квантовый выход зависит от двух параметров:

$$Q_{эфф} = \beta \cdot \gamma \quad (1.2)$$

где  $\beta$  – квантовый выход фотоэффекта, определяемый числом пар электрон-дырка, создаваемых внутри полупроводника каждым поглощенным квантом за счет процесса фото ионизации,  $\gamma$  – эффективность собирания носителей или, иначе, коэффициент разделения носителей потенциальным барьером **p-n**-перехода, показывающий какая часть из общего числа образованных световым излучением пар участвует в создании тока короткого замыкания ФП. Принято считать квантовый выход фотоэффекта равным единице, если каждый поглощенный фотон создает одну пару электрон-дырка. Известно, что в диапазоне энергий квантов оптического излучения, удовлетворяющих условию  $E_g < h\nu < 2E_g$  квантовый выход  $\beta$ , обусловленный фото ионизацией, в кремнии равен единице ( $E_g$  – энергия запрещенной зоны).

2) Одновременно с генерацией неравновесных носителей заряда при воздействии светового излучения происходит обратный процесс – рекомбинация носителей заряда противоположного знака, как в объеме, так и на поверхности полупроводника. Для количественной характеристики рекомбинационных процессов используют такие величины, как время жизни  $\tau_n, \tau_p$  и диффузионная длина  $L_n, L_p$  неосновных носителей заряда, а также скорость поверхностной рекомбинации  $S$ . Первые две величины связаны между собой через коэффициент диффузии

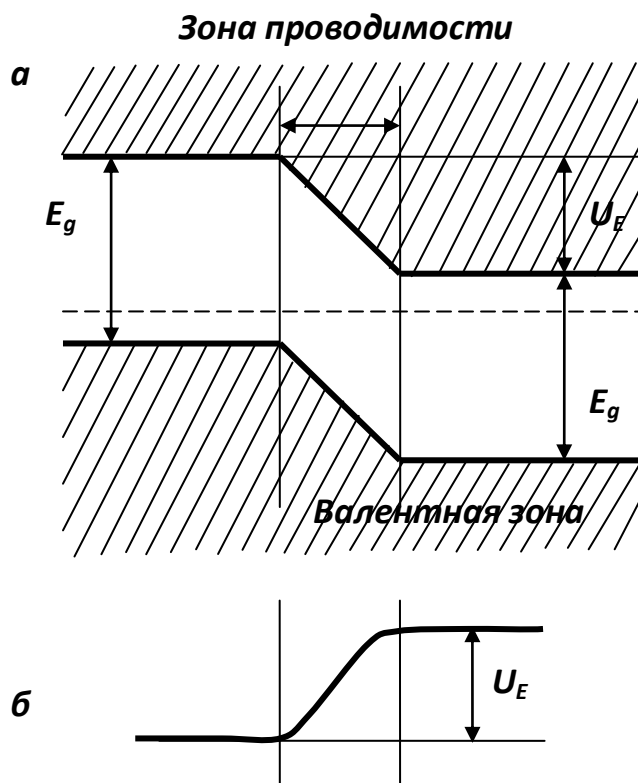
$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2}, L_p = (D_p \tau_p)^{1/2} \quad (1.3)$$

где  $D_n, D_p$  – коэффициенты диффузии неравновесных электронов и дырок. Вследствие рекомбинации не все созданные световым излучением носители заряда достигают p-n-перехода.

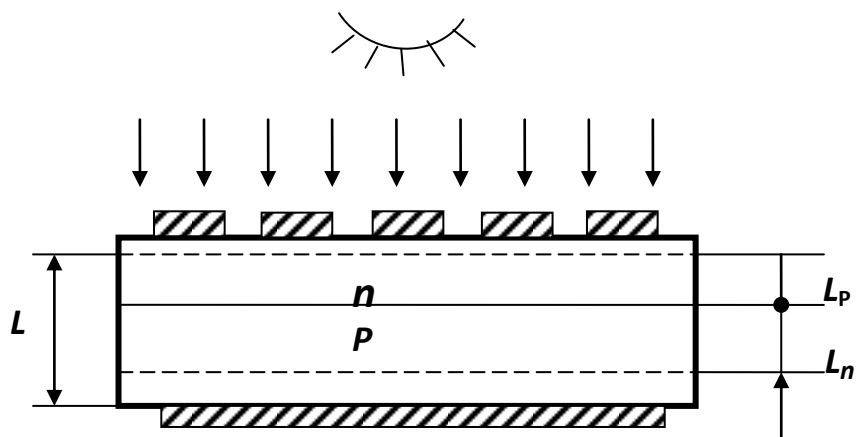
Количество пар, достигающих p-n-перехода определяется с соотношением между диффузионной длиной и расстоянием от места генерации пары до p-n-перехода. Очевидно, что для повышения эффективности собирания носителей p-n-переходом значение

диффузионных длин носителей должно быть больше ширины базы ФП. Это достигается выбором соответствующих материалов для изготовления ФП и соответствующих технологических режимов.

Поскольку в сильнолегированной поверхностной области полупроводника  $L$ , как правило, не велика ( $L_p$  на рис. 1.2), необходимо приближать область р-п-перехода к фронтальной поверхности ФП, чтобы все



**Рис. 1.1.** Структура энергетических зон полупроводника в области неосвещенного р-п-перехода (а) и распределение электрического потенциала (б).



**Рис. 1.2.** *Схема расположения р-п-перехода в полупроводниковом кристалле, на базе которого изготовлен ФП.*

созданные светом носители могли быть собраны и разделены полем р-п-перехода. Подобное же условие следует выполнять и для базовой области ФП, расположенной за р-п-переходом. Для обычной планарной структуры ФП необходимо соблюдать условие, чтобы толщина базы была сравнима с величиной диффузионной длины неосновных носителей заряда, а последняя сравнима с глубиной проникновения света в кремний.

На основные фотоэлектрические параметры ФП такие как форма ВАХ и спектральная чувствительность, влияют как оптические, так и электрофизические свойства полупроводника. И лишь детальный анализ может позволить сделать вывод о том чем обусловлены те или иные эксплуатационные параметры ФП.

3) Уже в первых работах, посвященных теории и экспериментальному исследованию свойств ФП, было показано, что ВАХ ФП отличается от ВАХ полупроводникового диода появлением члена  $I_\phi$ , обозначающего ток, генерируемый ФП при освещении, часть которого течет через диод ( $I_d$ ), а другая часть через внешнюю нагрузку ( $I$ ):

$$I_\phi = I_d + I \quad (1.4)$$

где

$$I_d = I_0 \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1.5)$$

Обычная темповая характеристика в которой  $I_0$  – обратный ток насыщения **р-п** – перехода,  $q$  – заряд электрона,  $T$  – абсолютная температура,  $k$  – константа Больцмана,  $U$  – напряжение. При разомкнутой внешней цепи, когда её сопротивление бесконечно велико и  $I = 0$ , из приведенных уравнений можно определить напряжение холостого хода  $U_{xx}$  ФП:

$$U_{x.x} = \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) \frac{kT}{q} \quad (1.6)$$

Для реального ФП характерно наличие последовательного сопротивления контактных слоев, сопротивлений каждой из р и n областей элемента, переходных сопротивлений металл–полупроводник, а также шунтирующего сопротивления  $R_{ш}$ , отражающего возможные поверхностные и объемные утечки тока по параллельным р-п – переходу каналам. Учет этих сопротивлений и рекомбинации в р-п – переходе приводит к развернутому выражению для ВАХ

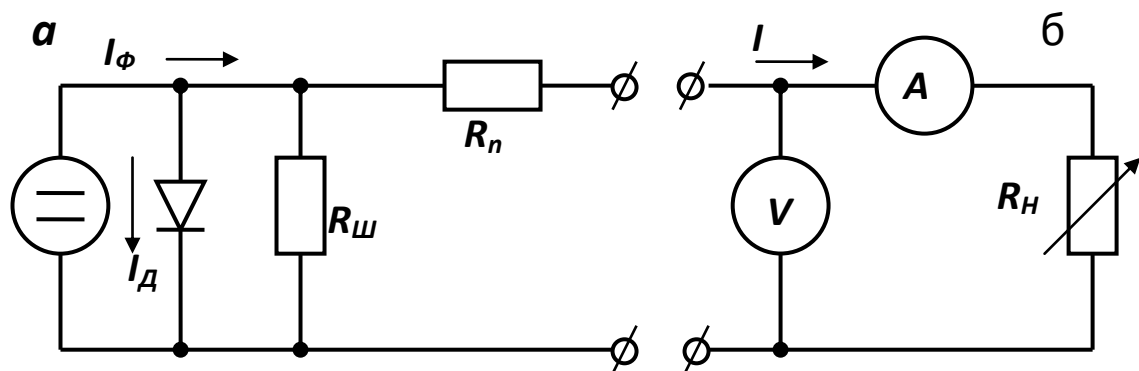
$$\ln\left(\frac{I + I_{\Phi}}{I_0} - \frac{U - IR_n}{I_0 R_{ш}} + 1\right) = \frac{q}{AkT}(U - IR_n) \quad (1.7)$$

В уравнение (1.7) введен коэффициент  $A$ , отражающий степень приближения параметров реального прибора к характеристикам идеального.

Это уравнение можно записать в более удобном для практического применения виде:

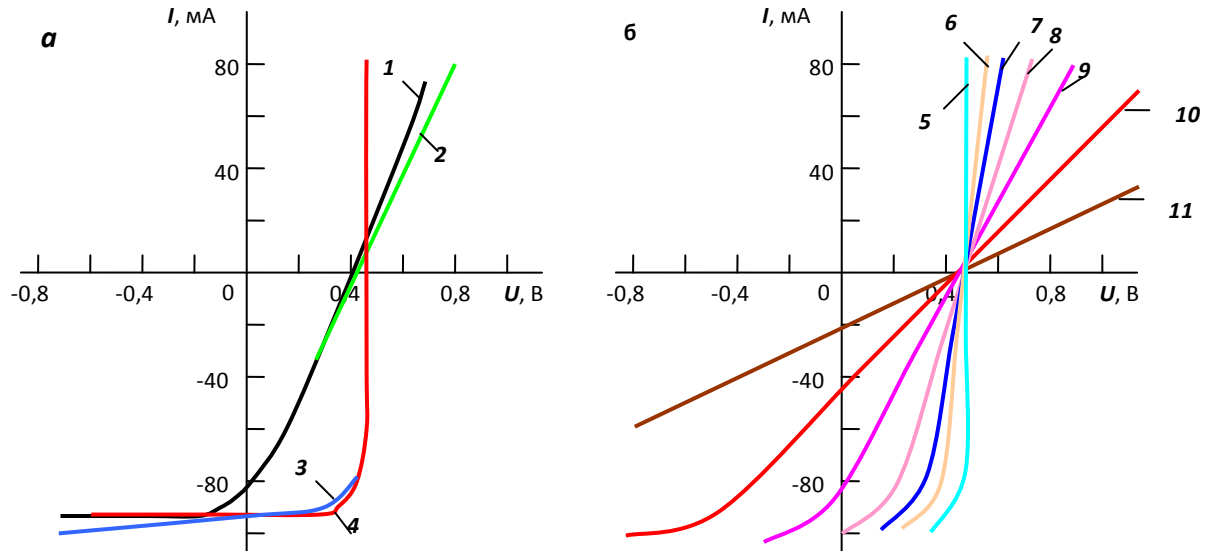
$$I = I_{\Phi} + I_0 \left( \exp \frac{q(U + IR_n)}{AkT} - 1 \right) - \frac{U + IR_n}{R_{ш}} \quad (1.8)$$

что позволяет построить эквивалентную и измерительную схемы ФП (рис. 1.3).



**Рис. 1.3.** Эквивалентная (а) и измерительная (б) электрические схемы ФП.

Расчет ВАХ по формуле (1.8) позволил наглядно представить влияние последовательного и шунтирующего сопротивлений на свойства ФП.



**Рис. 1.4.** Расчетные вольтамперные характеристики ФП для различных сочетаний  $R_n$  и  $R_{ш}$  (а) и для различных  $R_n$  и  $R_{ш} = \infty$ . 1, 2 –  $R_n = 5$  Ом,  $R_{ш} = 100$  и  $\infty$  соответственно; 3, 4 –  $R_n = 0$ ,  $R_{ш} = 100$  и  $\infty$ ; 5-11 –  $R_n = 0$ ; 1; 2; 3,5; 5; 10 и 20 Ом соответственно.

Результаты этих расчетов приведены на рис. 1.4. Выходная мощность, снимаемая с  $1 \text{ см}^2$  ФП, может быть оценена из соотношений

$$P = (I_n U_n)_{\max} = FF I_{к.з} U_{х.х} \quad (1.9)$$

где величина **FF**, называемая коэффициентом заполнения ВАХ, показывает степень приближения ВАХ к прямоугольной форме:

$$FF = \frac{(I_n U_n)_{\max}}{I_{к.з} U_{х.х}} \quad (1.10)$$

**FF** = 0,8 – 0,9 означает, что эффективность ФП достаточно высока. Обычная величина **FF** у современных ФП составляет 0,7 – 0,8 /6-8/.



Уменьшение шунтирующего сопротивления от бесконечно большого до столь малого как 100 Ом, сравнительно мало влияет на форму ВАХ (рис. 1.4) и, следовательно на выходную мощность ФП. В то же время небольшое изменение последовательного сопротивления, например от 1 до 5 Ом, приводят к резкому ухудшению формы ВАХ и значительному снижению выходной мощности.

Очевидно, что существует некоторое оптимальное значение

$$R_n = R_{\text{опт}}$$

свое для каждого уровня освещенности, при котором  $P$  достигает значения  $P_{\text{max}}$ . Значения  $I_{\text{опт}}$  и  $U_{\text{опт}}$  определяются из соотношений

$$U_{\text{опт}} \approx U_{\text{x.x}} - \left( \frac{AkT}{q} \right) \ln \left( \frac{qU}{AkT} + 1 \right) \quad (1.11)$$

$$I_{\text{опт}} \approx I_{\Phi} \left[ 1 - \frac{AkT}{qU_{\text{опт}}} \right] \quad (1.12)$$

Основным параметром, характеризующим работу ФП является коэффициент полезного действия – КПД ( $\eta$ ), т.е., эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую. КПД ФП вычисляется из соотношения

$$\eta = \frac{P}{P_c} = \frac{FFI_{\text{к.з}} U_{\text{x.x}}}{P_c} \quad (1.13)$$

где  $P_c$  – мощность солнечного излучения, падающего на ФП.

При разработке и анализа параметров ФП следует, что для достижения оптимальных параметров ФП основное внимание следует уделять условиям, при которых получают структуры с минимальным  $R_n$  и максимальным  $R_{\text{ш}}$ , при этом, разумеется, что необходимо добиваться максимальной эффективности собирания генерированных светом неравновесных носителей заряда, что и определит максимальную мощность и КПД ФП.

## **1.2. Технология изготовления фотоэлектрических батарей на основе кристаллического кремния**

Среди различных типов ФП лишь монокристаллические кремниевые солнечные элементы в настоящее время нашли широкое применение в гелиоэнергетике (например, в системах энергообеспечения искусственных спутников Земли). Большой практический опыт и знания, накопленных при производстве монокристаллических кремниевых ФП, обеспечивает возможность перехода к полностью автоматизированной технологии изготовления солнечных элементов. Если к тому же учесть, что кремний относится к наиболее распространенным в природе химическим элементам, а монокристаллические кремниевые солнечные элементы обладают высокой эффективностью (КПД достигает 18 – 19 %), то кремний можно считать со всех отношений перспективным материалом для создания наземных фото энергетических станций. Поэтому в настоящем обзоре мы уделим наибольшее внимание истории развития и современному состоянию теории и практики создания ФП на основе монокристаллического кремния.

Развитие высокоэффективных кремниевых ФП с обычным p-n-переходом в гомогенном материале в основном происходило путем снижения глубины залегания p-n-перехода. Если у первых образцов ФП она составляла 7 - 10 мкм /8/, то у современных ФП она составляет от 0,1 до 0,15 мкм /8-9/. В работе /2/ показано, что чувствительность ФП в спектральной области от 0,4 до 0,9 мкм возрастает в среднем на порядок величины при уменьшении глубины залегания p-n - перехода от 1,2 мкм до величины  $\leq 0,3$  мкм. Стремление приблизить p-n-переход к поверхности вполне понятно, поскольку большая часть световой энергии поглощается на глубине менее 0,5 мкм /9-11/ и большая часть носителей заряда теряется из-за рекомбинации в приповерхностном сильнолегированном слое.

Логическим пределом движения в этом направлении являются поверхностно-барьерные ФП различных типов, у которых поле объемного заряда подходит вплотную к поверхности. Однако, в этом случае возрастает отражение света от поверхности ФП, покрытого металлической пленкой, создающий поверхностный барьер. Технологически задача создания мелкозалегающих переходов была решена с развитием техники ионного легирования /12-14/ и совершенствованием теории и практики термической диффузии примесей в полупроводниках.

Разработка солнечных элементов с р-п - переходом, расположенным на глубине менее 0,2 мкм в значительной мере решила проблему пространственного разделения носителей заряда, генерированных коротковолновым излучением. Действительно коэффициент собирания  $Q$  у подобных ФП даже при  $\lambda=0,4$  мкм достигает 0,9, тогда как при глубине залегания перехода  $> 0,4$  мкм,  $Q=0,5 - 0,6$ .

В силу высокой чувствительности в фиолетово-голубой области подобные ФП получили название фиолетовых. Плотность тока короткого замыкания таких элементов удалось довести до 40 - 42 мА/см<sup>2</sup> /6/.

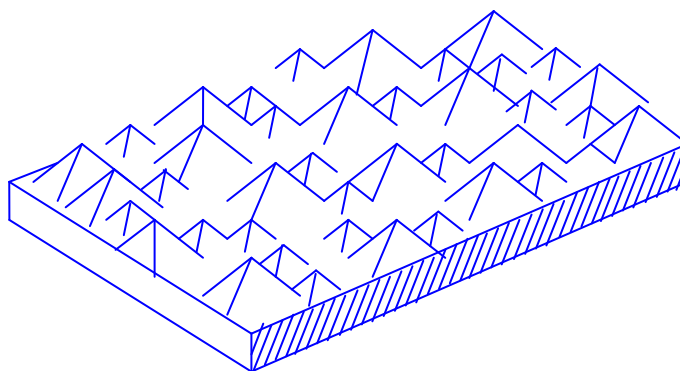
Для уменьшения потерь на отражение света был разработан метод обработки поверхности кремния, позволивший создать неотражающий или «черный» элемент из кремния с высоким КПД. Отличие такого ФП – особый пирамидальный текстурированный (Рис. 1.5) рельеф фронтальной поверхности ФП. В результате даже в отсутствии просветляющей пленки на поверхности ФП подобный рельеф снижает коэффициент отражения до 10 %, а при нанесении просветляющей пленки коэффициент отражения снижается до 2 – 3 % интегрально по всему солнечному спектру. Дополнительный эффект текстурированные поверхности – уменьшения глубины проникновения света, происходящее в результате этого возрастания коэффициента поглощения света приводит к увеличению коэффициента собирания и плотности фототока.

Помимо традиционной плоской планарной конструкции последние годы широко исследуются солнечные элементы со сложной конфигурацией р-п-перехода, в частности с р-п-переходом, расположенным по нормали к освещаемой поверхности. Они могут изготавливаться либо на общей подложке, либо набираться из микроэлементов объединенных материалом контакта (слоем припоя или алюминия).

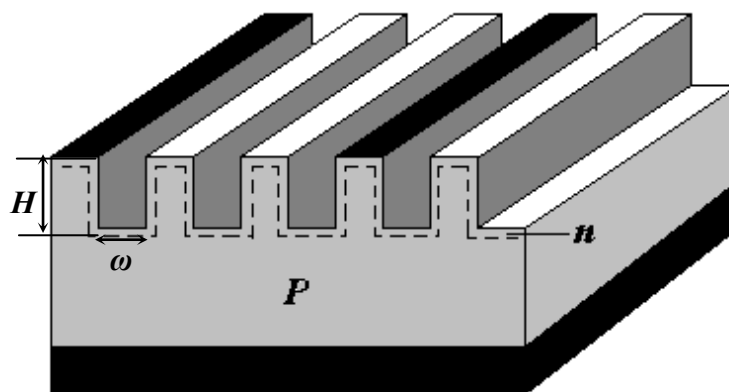
Вертикальное расположение р-п-переходов дает дополнительные возможности улучшения показателей ФП. При последовательном соединении р-п-переходов ФП генерирует высокие напряжения вплоть до десятков В/см и эффективно работают в условиях высоких уровней освещенности (концентрированное излучение). Параллельное включение подобных элементов позволяет получить большие токи, и, следовательно, высокий КПД ФП. Наиболее удачно последняя конструкция реализована в ФП с рельефной поверхностью, схематически изображенной на рис. 1.6. Рельеф в данном случае создается методом избирательного травления (например, в щелочи) пластин кремния с ориентацией (110). Легированный  $n^+$  - слой повторяет рельеф поверхности. Геометрические размеры элементов рельефа могут задаваться в широких пределах значений.

Так американские специалисты, разработчики этой рельефной конструкции предложили и изготовили структуры со следующими параметрами:  $H = 100 - 150$  мкм, шаг  $\omega = c = 7-8$  мкм. Рельефная фотоприемная поверхность обладает весьма высоким коэффициентом оптического поглощения, характерным для текстурированной поверхности, благодаря чему потери на отражение у рассматриваемого ФП минимальны. Если у подобных ФП  $\omega \leq L$ , то практически все генерированные светом в базе ФП пары носителей оказываются собранными. Это результат близкого расположения вертикальных участков р-п-переходов.

Улучшение оптических и фотоэлектрических характеристик ФП достигается также созданием легированном и базовом слоях ФП тянущих полей (за счет, например, направленного изменения распределения примесей или градиента ширины запрещенной зоны по глубине ФП). Влияние внутренних электрических полей на эффективность собирания и КПД ФП изучены достаточно подробно /19-23/.



**Рис. 1.5.** *Текстурированная поверхность кремния пирамидальной формы.*



**Рис. 1.6.** *Структура p-n-переходом сложной конфигурации.*

Разработаны ряд моделей полей, позволяющих существенно улучшить параметры ФП, в частности, их спектральную чувствительность. Однако, технология создания ФП с тянущими полями значительной протяженности в базе прибора довольно трудно и сложно воспроизводима, поэтому

модели ФП с тянущим полем скоро были вытеснены моделью с резким изотопным переходом  $n^+-n^+$  и  $p^+-p^+$  типа у тыльного омического контакта.

Для создания высокоэффективных ФП на этом принципе можно было бы использовать почти собственный кремний, про диффундировав примеси p- и n- типов с различных сторон пластины таким образом, чтобы получить на необходимом расстоянии от поверхности p-n-переходы, одновременно, оптимальный градиент примеси у тыльного контакта. При изготовлении ФП  $n^+-p-p^+$  и  $p^+-n-n^+$  типа структур оказалось, что создать тонкий и резкий изотопный переход у тыльного металлического контакта технологически намного проще, чем тянущее поле значительной протяженности, а практический результат (увеличение  $Q_{эфф}$ ) получается не хуже.

Механизм этого эффекта заключается в том, что потенциальный барьер на изотопном переходе отражает неосновные носители от тыльного контакта, увеличивая их эффективную диффузионную длину, и практически сводя к нулю поверхностную рекомбинацию на границе раздела базовый слой – тыльный металлический контакт. Несколько уменьшается также обратный ток насыщения элементов. Тыльный под легированный слой создается термической диффузией, ионной имплантацией или эпитаксией. Глубина под легированного слоя обычно колеблется от 0,2 до 0,5 мкм, а распределение примесей практически повторяет профиль распределения примеси создающей p-n-переход на фронтальной поверхности пластины кремния.

### **1.2.1. Технология изготовления фотоэлектрической батареи**

При солнечном освещении в условиях АМ 1,5 можно изготовить модули (или ФЭБ) в лучшем случае с КПД до 18 %, что подчеркивает необходимость решения проблемы, связанной с потерями. Потери мощности в технологии изготовления ФЭБ разделяются на электрические и оптические потери. Электрические потери в основном связаны с

точностью разбраковки СЭ в точке оптимальной нагрузки и потерями при коммутации СЭ в батарею. Оптические потери связаны с возможными неоднородностями при герметизации ФЭБ и оптическими потерями на защитном стекле и в герметике.

При разбраковке СЭ основное внимание уделяется точности измерения тока в точке оптимальной нагрузки элемента. Разбраковка СЭ производилась при заданном значении внешней нагрузки, например, при значении напряжения равном 0,4 В, по значению тока. Измеренные параметры СЭ в зависимости от площади имели разброс по току от 1 до 4 %. Для пайки СЭ в ФЭМ использовались медные шины шириной от 0,2 до 1 мм, обложенные припоем ПОС-61 толщиной 0,05 – 0,1 мм. Пайка проводилась при помощи бес кислотных флюсов, (рис. 1.6.) а затем на каждый СЭ наносился паяльный флюс. Паяльный провод разогревается паяльником, после чего СЭ размещают в специальные коробки. А затем производится очистка СЭ при помощи ультразвука в дистиллированной воде с температурой 60 градусов (рис.1.7.). В этой операции осуществляется очистка от грязи, пыли, жировых загрязнений. При высокочастотной ультразвуковой очистке при 42 кГц удаляются даже мелкие частицы грязи, недоступные при очистке обычным способом. Высушенные и полностью очищенные СЭ подготавливаются к сборке. Перед сборкой СЭ в ФЭМ осуществляется процесс сортировки по параметрам при естественном освещении или в имитаторе.



**Рис.1.6.** *СЭ с напаянным плоским проводником (монтажной медной шиной)*



**Рис.1.7.** *Ультразвуковая ванна для очистки различных электронных компонентов*





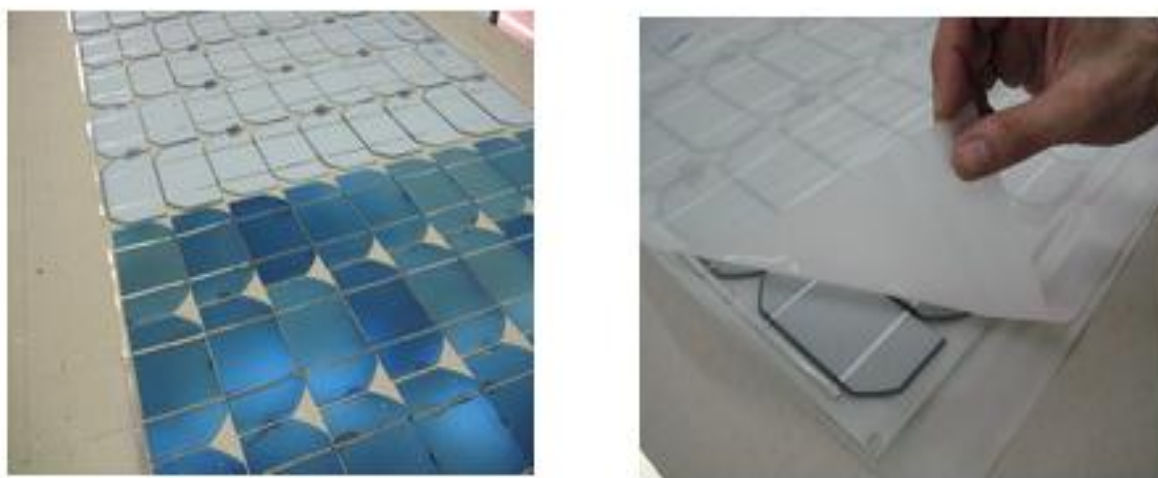
**Рис.1.8.** *Цепочка СЭ перед сборкой в модули*

Потом приступают к пайке нескольких СЭ в группы (рис.1.8.). Вначале наносится паяльная паста (флюс), улучшающая качество пайки, и затем собираются 5 групп по 8 СЭ в каждой. Зачастую применяются шаблоны (формы со строгим размещением цепочки последовательно соединяемых элементов) для пайки СЭ, изготовленные из текстолита, эбонита или дюралюминия.

Крепить СЭ нужно край к краю и обращаться с ними крайне осторожно. Группы, которые состоят из 8 СЭ, соединяются последовательно. Для проверки качества пайки на имитаторе солнечного излучения или в натуральных условиях на естественном Солнце при помощи прибора проверяется напряжение холостого хода и ток короткого замыкания. Если солнечный элемент какой-то группы не работает, то на этом этапе пайку легко исправить. Если электрические параметры всех элементов соответствует норме, то СЭ, размещенные в 8 рядов, поднимают пневматическим захватом. Это делается для того, чтобы не загрязнить поверхность СЭ и облегчить сам процесс сборки. Чтобы коммутировать СЭ, через них пропускается металлическая лента, являющаяся

проводником и связывающая воедино 5 групп из 8 СЭ. Затем (рис.1.9.) каждый из элементов приваривается к металлической ленте.

Сверху панель из СЭ покрывается листом прозрачного стекла, служащего жесткой основой, поддерживающей модуль. Это - закаленное стекло с антибликовой поверхностью или рифленое стекло с коэффициентом пропускания более 92 %. Передняя ламинирующая пленка (EVA) используется для полной герметизации СЭ и их плотного прилегания к стеклу (без воздушного зазора) с целью избежать дополнительное преломление света и потери мощности. Кроме того, герметизация защищает СЭ от атмосферных воздействий и возможной коррозии. На тыльной стороне СЭ располагается ламинирующая пленка (EVA).



**Рис.1.10.** Коммутированные цепочки СЭ, схемы из 40 солнечных элементов (слева), двух слоев герметизирующей пленки (EVA) и одного слоя защитной пленки (ПЭТ) (справа)



**Рис.1.10.** За ламинированный модуль

Для защиты модуля его заклеивают специальной защитной пленкой. Задней защитной пленкой служат РТ–полиэтилентерефталат, (polyethelenerfitalate), ТРЕ - Пленка из термо-пластичного эластомера (thermoplastic elastomerfilm), ТРТ–тедлар-полиэстер-тедлар (Tedlar-Polyester-Tedlar). Они также защищают элементы от атмосферных воздействий и возможной коррозии. Для ламинированные и придания дополнительной жесткости конструкции, модуль помещают в ламинирующее оборудование с вакуумом, где выдерживают в течение 15 минут при температуре 138 - 150 °С. При извлечении (рис.1.10) из вакуумной печи все компоненты панели оказываются прочно связаны воедино. Для проверки фотоэлектрический модуль помещают в специальный имитатор Солнца для тестирования. В имитаторе на ФЭМ с подсоединенными к вольтметру отрицательными и положительными контактами подают мощный поток света, считывая при этом показания с вольтметра.

Готовые ФЭМ (рис.1.11.а) из кристаллического кремния помещаются в пластиковую раму или в раму из алюминиевого профиля. Соединительная коммутационная коробка (рис.1.11.б) с защитными

диодами и соединительными кабелями устанавливается после монтажа алюминиевого профиля.



**А**



**В**

**Рис.1.11.** *А) Монтаж алюминиевого каркаса; В) установка клеммой коробки*

Защитные диоды необходимы для предотвращения перегрева и выхода из строя частично затененных элементов солнечной панели. Без них вся фотоэлектрическая панель может выйти из строя из-за выгорания одного из элементов. На рис.1.12. изображена фотография готовой ФЭБ после окончательного этапа. Ручной метод ламинирования изготовления ФЭБ осуществляется следующим образом: в качестве ламинирующих покрытий служат силиконовые смолы или синтетические каучуки (СКТН - синтетический каучук термостойкий низкомолекулярный, ГОСТ 13835-73). Ламинированные включает технологические операции вакуумировании, нанесении силиконовых смол или синтетического каучука с обеих сторон СЭ и высушивании (полимеризации) при температуре 30-35 °С в течение несколько суток. Технологические операции проводятся вручную.



**Рис.1.12.** *Общий вид ФЭБ, изготовленной в опытном цехе лаборатории «Полупроводниковые солнечные элементы»*

В качестве защитного покрытия с фронтальной стороны применяют каленое стекло различной толщины от разных производителей СНГ.

### **1.2.2. Применение фотоэлектрических батарей в условиях Узбекистана**

Промышленное производство фотоэлектрических батарей и модулей на основе полупроводниковых солнечных элементов (СЭ) достигло значения более 1000 ГВт (в 2016 г.) в год и относительный рост составляет 25–40 % в год. Основным материалом при производстве СЭ остается кремний. СЭ из кристаллического кремния с  $p-n$ —переходом по-прежнему занимают ведущее положение в фотоэлектрической энергетике, так как эффективность преобразования в кристаллических структурах, по аморфными, гораздо выше и их параметры не подвержены деградации в течении длительного времени. Тенденция уменьшения стоимости электрической энергии производимой СЭ, в дальнейшем связывается с ростом эффективности преобразования за счет улучшения качества



исходного кремния, разработкой новых эффективных конструкций элементов, увеличением объемов производства СЭ, использованием более дешевого кремния «солнечного класса» и других дешевых материалов и комплектующих при разработке фотоэлектрических установок, использование упрощенных технологий изготовления СЭ [24].

Наряду с вопросами производства, удешевления стоимости, увеличения эффективности преобразования солнечных элементов возникает вопрос об эффективности работы фотоэлектрических установок в зависимости от условий эксплуатации, в том числе от климатических условий, особенно от температуры и её колебаний в период летних месяцев в условиях жаркого климата регионов Центральной Азии.

Основные параметры фотоэлектрических батарей очень чувствительны изменению температуры.

В условиях жаркого резко континентального климата более 9 месяцев в году в дневное время температура окружающей среды достигает более 25 °С. К тому же, в этот период в подавляющем большинстве регионов скорость ветра в дневное время не превышает нескольких метров в секунду. В результате параметры, приведенные в паспорте, не соответствуют реальным параметрам ФЭБ. В летнее время температура в тени достигает более 45 °С, а на поверхности ФЭБ, с учетом влияния радиации Солнца, достигает значения более 90 °С. К тому же, за счет поглощения части солнечного излучения в структуре ФЭБ и оптических процессов отражений и поглощений на границах слоев структуры (воздух – защитное стекло – герметик – СЭ – герметик – тыльная пленка) и не оптимальностью теплофизических параметров структуры происходит «перегрев» ФЭБ по отношению к температуре поверхности защитного стекла. Этот «перегрев» может достигать, по предварительным расчетам, до 10 – 15 °С. Таким образом, разница в температуре, при которой, измерены параметры ФЭБ и условий работы, может составлять до 40 – 50 °С, а напряжение  $U_{xx}$  на одном СЭ уменьшиться до 130 мВ. Обычно ФЭБ

состоит из 36 последовательно коммутированных СЭ, поэтому уменьшение напряжения на одной батарее составит до 4,5 В. Кроме того, увеличение температуры приводит к ухудшению также формы нагрузочной ВАХ ФЭБ. Влияние этих факторов приведет к тому, что напряжение, вырабатываемого ФЭБ, будет недостаточно для зарядки аккумуляторной батареи (АБ), и ток зарядки АБ уменьшится в нескольких раз [25]. Проблема не до заряда в связи с «перегревом» особенно сказывается при использовании эффективных никель-кадмиевых и никель-металлогидридных АБ. В этих АБ, по мере повышения степени заряда АБ, напряжение зарядки повышается вплоть до 15 В. В результате эффективность работы фотоэлектрической установки намного уменьшится. Расчетные значения уменьшения КПД составляет более 25 % от аттестованного. На самом деле, в реальных условиях (июнь-август) республики Узбекистан снижение эффективности может составлять более 50 % от аттестованного значения. Это связано с тем, что температура отрицательно влияет на электрофизические параметры материала СЭ. В конечном итоге увеличивается значение последовательного сопротивления СЭ, соответственно, ФЭБ и ФЭУ в целом. В результате нагрузочные вольтамперные характеристики СЭ, ФЭБ сильно трансформируются в худшую сторону.

Концепция объединения солнечных фотоэлектрических и тепловых преобразователей появился из-за температурной зависимости солнечных элементов, в особенности их КПД. Поведение солнечных элементов под влиянием температуры, таких ее параметров как напряжение холостого хода ( $U_{x.x}$ ), ток короткого замыкания ( $I_{кз}$ ), коэффициент заполнения (FF) и эффективность зависят от температуры. Было замечено [26], что  $U_{x.x}$  уменьшается в пределах 2,3 мВ/К, где  $I_{кз}$  незначительно увеличивается с температурой. И следуют также уменьшение FF и это приводит к деградации в эффективности солнечных элементов [27]. Многочисленные

последующие исследования [28-30] представили результаты измерений и вычислений температурных коэффициентов параметров солнечных элементов различных значений [29]. В случае кремния [30], который наиболее широко используется [в нашем устройстве также], снижение,  $U_{x,x}$  вызванное повышением температуры солнечного элемента, составляет приблизительно 20 % в 25 – 100 °С диапазоне, и то же самое снижение наблюдается для, коэффициента заполнения и эффективность преобразования. Другие исследования [31] зарегистрировали, что снижение эффективности в пределах этого диапазона в реальных случаях может составить до 50 %. Охлаждение солнечного элемента, чтобы улучшить ее эффективность предлагалось и прежде. Следующее уравнение демонстрирует, что производство тепла, которое уменьшает производительность системы неизбежно. Где,  $\eta_0$  -вычисленная эффективность при данной температуре  $T_0$ ,  $\mu$  -температурный коэффициент КПД,  $T_{я}$  -температура элемента,

$$\eta = \eta_0 + \mu(T_{я} - T_0) \quad (1.3.1.)$$

Согласно уравнению, каждая фотоэлектрическая батарея производит не только электроэнергию, но и тепловую энергию, когда солнечное излучение падает на ее поверхность [31]. Кроме того, температуры элемента непосредственно пропорционально инсоляции [32], это означает, что для более благоприятных прикладных условий фотоэлектрические батареи ставятся в невыгодное положение из за влияния температуры. Поскольку электричество замечено как самый удобный тип энергии, использование солнечных элементов даже, несмотря на низкую эффективность выгодно. В настоящем использование энергии солнечного потока солнечными элементами составляет меньше чем 20 % и остальные, больше чем 80 % уходят в окружающую среду [32].

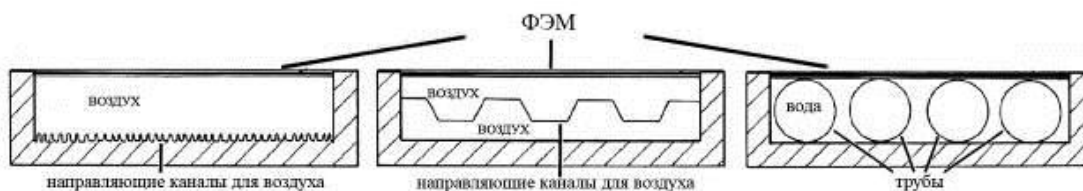


### **1.3. Методы повышения эффективности фотоэлектрических батарей**

Одним из возможностей увеличения эффективности солнечных элементов является создание многофункционального комбинированного фото-тепло-преобразователя (ФТП), система, состоящая из совмещенной фотоэлектрической батареи и солнечного коллектора. В такой системе происходит не только увеличение эффективности преобразования СЭ за счет снижения температуры утилизацией её коллекторной частью системы, но и увеличение в целом КПД всей системы за счет преобразования части излучения в тепло и передачи его также теплоприемнику коллекторной части системы.

Идея улучшить электрическую эффективность, уменьшая температуру фотоэлектрической батареи так же используя в своих интересах тепловую произведенную энергию, составляет основную идею в развитии ФТП. Более поздние работы показали, что в гибридном ФТП тепловая энергия может частично удовлетворить потребности для нагрева и охлаждения помещений в дополнение к их вкладу в электроэнергию.

ФТП является многофункциональной комбинированной системой, состоящей из совмещенной фотоэлектрической батареи и солнечного коллектора. Существуют два типа ФТП, с и без концентрации солнечной энергии. Система, использующая концентрирование солнечной энергии для теплоотвода применяет только жидкую среду (воду). Системы без концентрации солнечной энергии могут использовать жидкую или газообразную (воздух) среду.



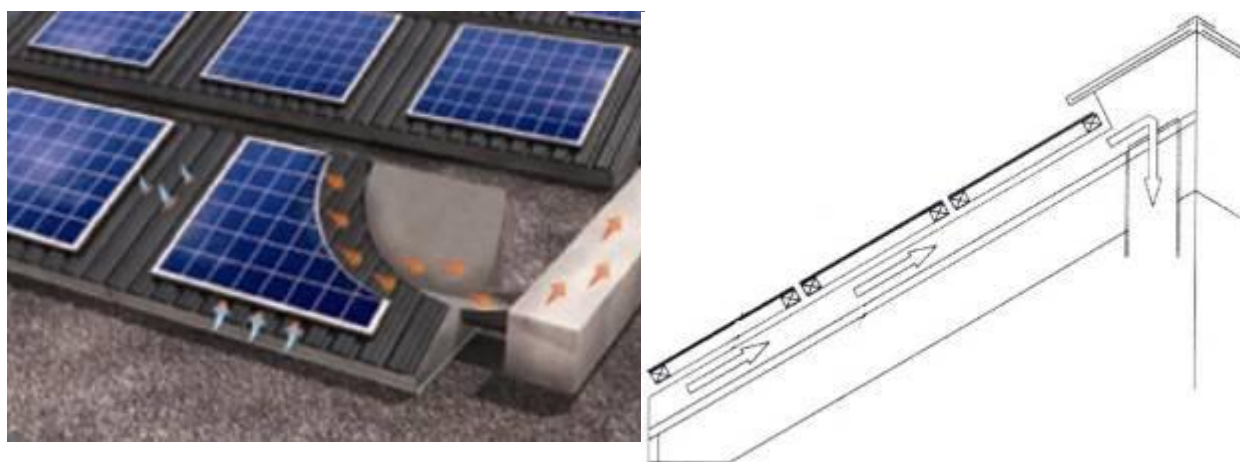
**Рис. 1.13.** Разрез разных видов ФТП

Модели с концентраторами более сложны технически, так как имеют систему слежения за солнцем. К тому же в них имеют место большие тепловые потери в окружающую среду. Для эффективного отвода тепла они используют циркуляционные насосы, которые употребляют часть произведенной энергии.



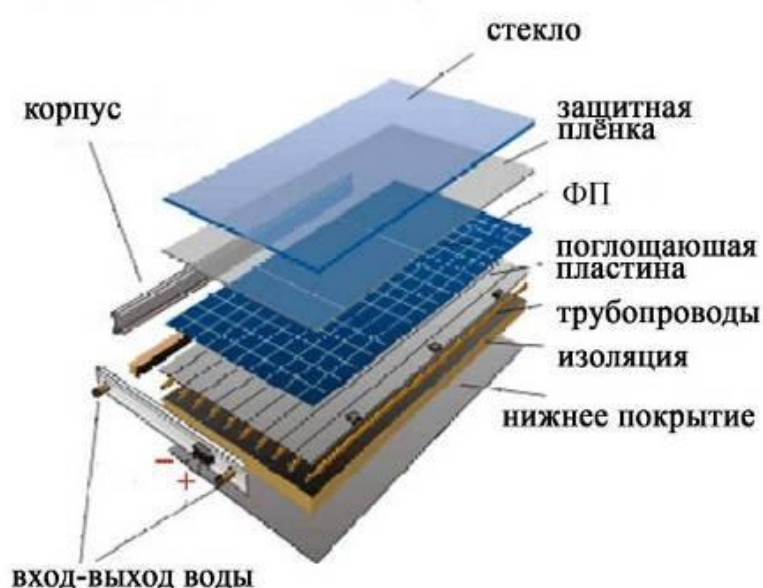
**Рис. 1.14.** Система ФТП с концентратором

Самым простыми являются модели с использованием воздуха. Но их недостаток, то, что воздух имеет низкую теплоёмкость по сравнению с водой. Таким образом, эффективность теплоотвода в них низкая, что не очень способствует повышению электрической эффективности и такие системы имеют сравнительно низкий общий КПД.



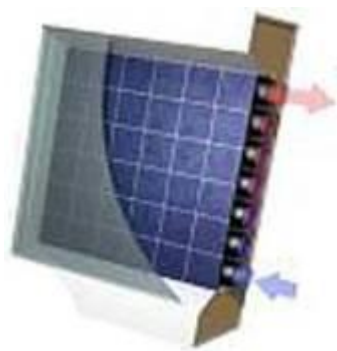
**Рис. 1.15.** Система ФТП с воздушным теплоотводом

Конструкции существующих моделей ФТП это в основном прямое расположение ФЭМ на СК. Где теплоноситель движется внутри труб расположенных под ФЭМ.



**Рис. 1.16.** Наиболее распространенная конструкция ФТП

Из соображений эффективной утилизации солнечной энергии после ФЭМ, рабочее тело должно иметь прямой контакт с источником тепла которым является ФЭБ.



**Рис. 1.17.** Система ФТП- ламинит для покрытие зданий

Рассмотренные выше примеры исполнения ФТП показали, что, несмотря на оригинальность и технологичность исполнения, они обладают явные недостатки. Поэтому нет необходимости в анализе большого количества подобных устройств для того, чтобы наметить пути оптимизации параметров и дизайна ФТП и прежде всего их термальную эффективность, что повысит фотовольтаическую эффективность и обеспечит высокое значение КПД всего устройства.

#### **1.4. Выводы**

1. Проанализированы современное состояние использования фотоэлектрических станций, зависимость параметров от различных факторов и климатических условий, современная технология изготовления солнечных элементов на основе кристаллического кремния и фотоэлектрических батарей.
2. Рассмотрены вопросы эффективного использования фотоэлектрических систем в условиях климата республики Узбекистан и возможные методы повышения эффективности преобразования и использования в условиях жаркого климата республики.

## **II ГЛАВА**

### **ФОТО ТЕПЛОВЫЕ БАТАРЕИ – ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

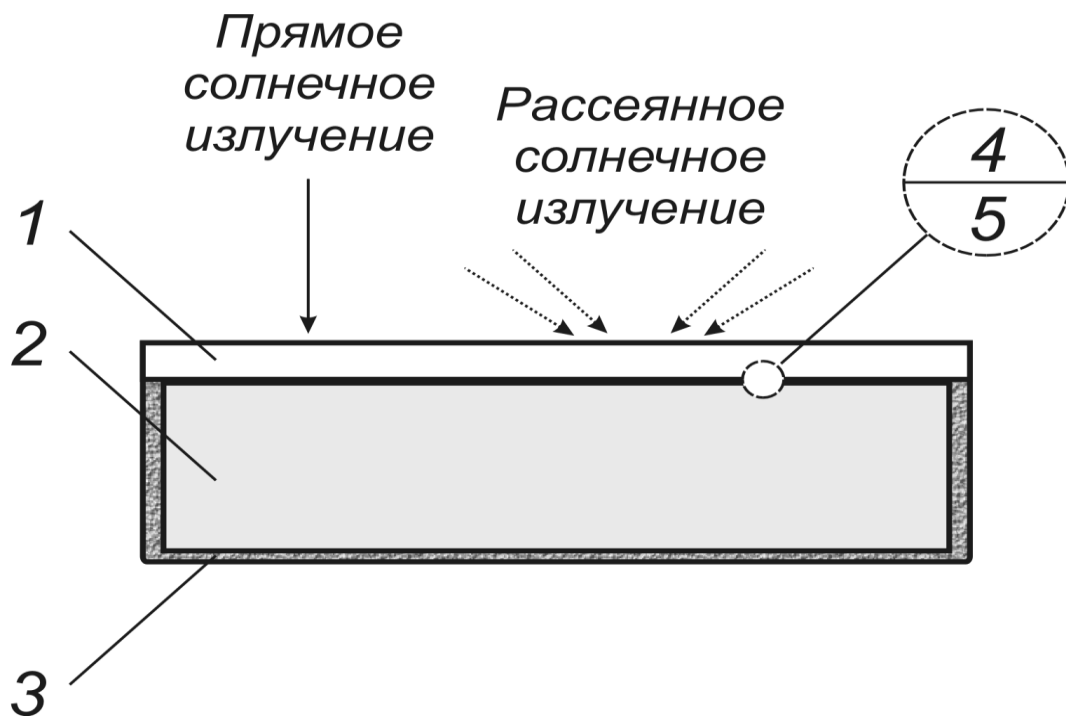
#### **2.1. Конструкция и технология изготовления фото тепловых батарей**

Проблема создания конструкции фототепловых батарей связана с технологией изготовления фотоэлектрических батарей, а также возможностью стыковки с другими компонентами фотоэлектрических установок, таких как, системой аккумулирования энергии и электронные блоки управления и контроля (инверторы и контроллеры) с относительно более жесткими требованиями к соответствующим параметрам. В разработке предусматривается максимальный учет возможности применения материалов, комплектующих узлов изготовленных в республике. В качестве основного материала защитного покрытия и несущей конструкции ФЭБ благодаря механическим свойствам, выбрано листовое оксидное неорганическое стекло. Такое стекло отличается прозрачностью в различных областях спектра. Поскольку неорганическое стекло является хрупким материалом, не обладающим пластической деформацией и весьма чувствительно к механическим воздействиям, особенно ударным, оно было упрочнено термической закалкой, способствующей созданию в нём поверхностных сжимающих напряжений. Причём прочность закалённого стекла в 4 – 6 раз превышает прочность отожжённого. Также следует отметить, что неорганическое стекло относится к классу изоляторов и характеризуется высокой стойкостью к действию влажной атмосферы, воды, кислот.

Многофункциональная комбинированная фото тепловая установка на основе кремниевых солнечных элементов (рис.2.1.) состоит из фото тепло преобразователя который включает в себя следующие основные элементы

/33-34/: *фотоэлектрическая батарея*, которая выполняет двойную функцию, а именно, поглощает солнечную радиацию, преобразует её часть в электричество, остальную часть энергии передаёт жидкости, поскольку является частью поглощающей поверхности *солнечного коллектора*. Если рассматривать ФЭБ как элемент типичного плоского СК, то солнечные элементы, тыльный слой герметика, полиэтиленовая пленка, окрашенная в чёрный цвет, являются поглощающей поверхностью СК. Прозрачные относительно СИ защитное стекло и фронтальный слой герметика, расположены над поглощающей поверхностью. Они уменьшают конвективные и радиационные потери в атмосферу. Теплоизоляцией коллектора является материал, имеющий низкую теплопроводность, предназначенный для уменьшения потерь тепла в окружающую среду. В качестве теплоизоляционного материала использовалась монтажная пена, представляющая собой полиуретановую пену, застывающую под воздействием влаги, содержащейся в воздухе. Таким образом, ФТП используется как генератор электрической энергии и как водонагреватель с динамическим охлаждением тыльной поверхности ФЭБ за счёт конвекции теплоносителя находящегося в контейнере коллектора [ 35 ].

Конструкция устанавливается неподвижно с оптимальной ориентацией для конкретного местоположения и времени года, в течение которого она должна функционировать. Фотоэлектрическая установка может применяться для нагрева теплоносителя до температур, не превышающих температуру окружающей среды более чем на 100 °С. К преимуществам следует отнести возможность использования как прямой, так и рассеянной радиации. Эффективность генерации электрической энергии фотоэлектрической батареи во многом определяется параметрами коллекторной части фото тепловой батареи, поэтому большая часть анализа данной главы выполнена применительно к коллектору.



**Рис 2.2.** Принципиальная схема плоского фото тепловой батареи  
 1 — фотоэлектрическая батарея; 2 — контейнер с теплоносителем; 3 — теплоизоляция; на выноске — фрагмент поглощающей поверхности, состоящий из герметика (4) и полиэтиленовой пленки (5), окрашенной в чёрный цвет.

На рис.2.2. приведена переносная фото тепловая установки, изготовленная в 2008 году. Площадь и мощность ФЭБ составляет 0,2 м<sup>2</sup> и 13 Вт соответственно. Емкость аккумулирующей части 6 литров, предусмотрена ручная оперативная ориентация по Солнцу. Вес установки без наличия воды 13 кг.





**Рис.2.3.** Переносная опытная ФТП установка на основе СЭ.  
 а – площадь фотоэлектрической батареи 490 x 310,  
 б – емкость резервуара для горячей воды 6 литров,  
 в – емкость коллекторной части 3 литра, вес без воды – 13 кг.

Таблица 1

Экспериментальные параметры, полученные при испытании в условиях  
 ФТИ НПО «Физика-Солнце»

№ п/п	Температура окружающей среды, °С	Температура воды на входе, °С	Температура воды на выходе, °С	Производительность, л/час
1	31	20	55	1,5
2	23	16	25	8



3	25	18	26	9
4	30	19	30	7

В таблице 1 приведены некоторые экспериментальные данные по воде, полученные в мае 2008 года. Электрическая мощность фотоэлектрической батареи при температуре 23 °С и  $E = 800 \text{ Вт/м}^2$  составляет около 10 Вт. С увеличением температуры окружающей среды до 31 °С за счет нагрева СЭ мощность уменьшается 8,7 Вт.

## **2.2. Переносная фото тепловая установка и ее эксплуатационные параметры**

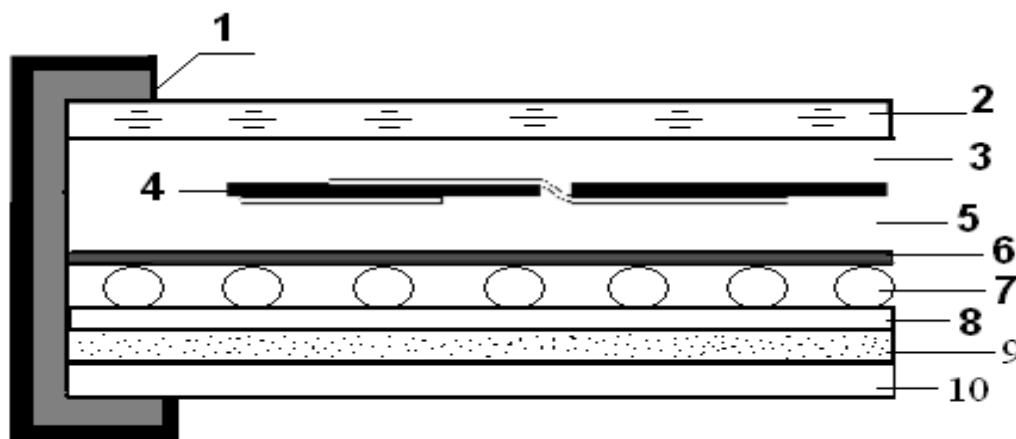
Для кремниевых солнечных элементов оптимальный диапазон преобразования энергии солнечного излучения приходится на инфракрасный спектр  $1,1 \div 1,5 \text{ эВ}$ . Коротковолновое солнечное излучение нагревает СЭ, что приводит повышению его температуры, уменьшению напряжения холостого хода, вследствие чего эффективность преобразования энергии солнечного излучения уменьшается на  $\sim 40\%$  [36]. Если температура окружающей среды более 35 °С (страны с жарким климатом, к которым относится и Республика Узбекистан), то эффективность преобразования солнечной энергии сильно уменьшается и применение ФЭБ становится нецелесообразным. Очевидное решение этой технической задачи заключается в создании комбинированных установок, т.е. установок состоящих из ФЭБ, коллекторов, термоэлектрических преобразователей и работающих как единая система. За счет полной утилизации энергии солнечного излучения эффективность таких установок увеличивается и составляет порядка 60 - 80 % [36-38,40]. Следует отметить, что комбинированные установки занимают меньшую площадь по сравнению с системами, состоящими из отдельных фото и тепло

преобразователей [39-41]. Очевидно, что снижение рабочей температуры СЭ за счет теплоотвода повышает эффективность преобразования солнечного излучения и увеличивает срок их эксплуатации. Имеется несколько конструкций комбинированных установки на основе ФТБ, принцип действия которых основан на прямом тепловом контакте теплоносителя с тыльной стороной ФЭБ [42-43]. Такие конструкции ФТБ имеют ряд существенных недостатков. Во-первых, необходимо гидроизолировать тыльную сторону ФЭБ, чтобы избежать непосредственного контакта СЭ с теплоносителем. Гидроизоляция увеличивает вес и себестоимость установки, и все равно остается вероятность протекания теплоносителя и его контакта с СЭ, что может привести к замыканию электрической цепи и преждевременному выходу из строя СЭ и всей ФЭБ в целом. Во-вторых, эффективность ФТБ не может быть повышена за счет увеличения линейных размеров, т.к. с увеличением размеров увеличивается масса теплоносителя и соответственно увеличивается давление теплоносителя на ФЭБ и всю конструкцию в целом. Повышение прочности конструкции с помощью дополнительных ребер жесткости не снимает проблему в целом и увеличивает стоимость ФТБ.

Была поставлена задача создания ФТБ свободной от вышеуказанных недостатков и исследование ее электрических и теплотехнических характеристик. На рис. 2.4 приведена ее принципиальная схема и на рис.2.5. фотография установки. В основу конструкции легла ранее разработанная нами ФЭБ, собранная из 40 последовательно соединенных СЭ на основе монокристаллического кремния с КПД  $\sim 18,5\%$  и размерами  $156 \times 156 \times 0,2$  мм. В условиях АМ1 мощность ФЭБ составила 170 Вт, напряжение холостого хода 23,8 В, а ток короткого замыкания более 8.5 А. К тыльной стороне ФЭБ приклеен защитный слой из полиамидной пленки. Солнечный водонагреватель представляет собой медную трубку диаметром 10 мм, изогнутую в форме меандра. Коллектор не контактирует с ФЭБ. Контакт с ФЭБ происходит с алюминиевой пластиной толщиной

0,3 мм. Площадь контакта меандра с листом алюминия составляет порядка 5 % площади алюминиевого листа. Объем меандра 1,5 литра. Для уменьшения тепловых потерь по периметру коллектор покрыт отражающей алюминиевой фольгой. Толстый слой теплоизолирующего покрытия с тыльной стороны ФТБ закреплен листом алюминия толщиной 2

мм.  
Опорное  
устройство  
состоит



ано из профилированного алюминия и снабжено механизмом ориентации относительно Солнца.

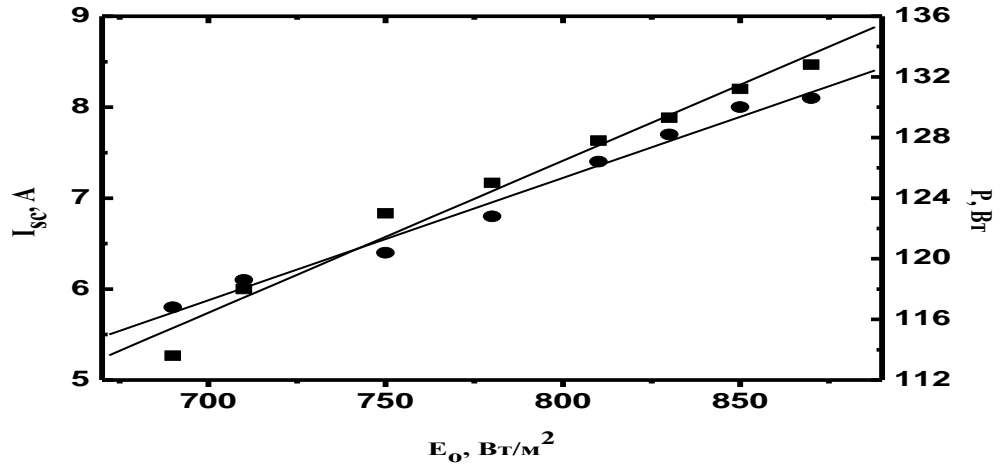
**РРис.2.4.** Конструкция комбинированной ФТБ

*1 – корпус; 2 - стекло каленное ( толщина-5мм); 3,5 -силиконовый герметик; 4- СЭ; 6-алюминевый лист; 7 - коллектор в форме «меандра»; 8 - отражающая фольга; 9 - теплоизоляционный материал; 10 - тыльная крышка.*



***Рис.2.5. ФТБ (справа) и ФЭБ (слева) во время испытания на солнечном полигоне Физико-технического института***

Методика измерения параметров ФТБ обусловлена потребностями сельского жителя, который для получения горячей воды должен заранее залить резервуар (80 литров) холодной водой. Емкость резервуара зависит от производительности горячей воды и потребности использования в течение дня. Специальное покрытие для резервуара не было предусмотрено. Измерялись следующие характеристики ФТБ: ток короткого замыкания  $I_{sc}$  и напряжение холостого хода  $U_{xx}$  батареи, интенсивность солнечного излучения, производительность по горячей воде, температура окружающей среды и температуры воды на входе и выходе коллектора, время экспозиции. Измерения проводились на солнечном полигоне Физико-технического института течение дня с 10:<sup>00</sup> часов утра до 16:<sup>00</sup> часов вечера; погода ясная, скорость ветра в течение измерений постоянная  $\approx 1,9$  м/сек, изменение температуры окружающей среды, утром 26 °С (10:<sup>00</sup> часов), вечером 33 °С (16:<sup>00</sup> часов. Результаты измерений представлены на рис. 5 и 6.



**Рис.2.6.** Экспериментальные зависимости тока короткого замыкания  $I_{sc}$  и мощности  $P$  ( Вт ) от плотности потока солнечного излучения

Мощность  $P$  и эффективность ФТПБ  $\eta$  вычисляли по формулам:

$$P = \xi I_{sc} U_{x.x}$$

$$\eta = \frac{\xi U_{xx} I_{sc}}{E_o S}$$

$\xi$  - коэффициент заполнения вольтамперной характеристики СЭ, значение которого для типичных солнечных элементов изменяется в пределах от 0,7 до 0,77;  $E_o$  - плотность потока падающего солнечного излучения Вт/м<sup>2</sup>,  $S=0,97$  м<sup>2</sup> - площадь ФТБ. Зависимость тока короткого замыкания  $I_{sc}$  и вырабатываемой мощности  $P$  от плотности потока падающего солнечного излучения  $E_o$  являются линейными (коэффициент корреляции  $\sim 1$ )

$$I_{sc} = 0,01 \cdot E_o - 3,53$$

$$P = 46,3 + 0,1 \cdot E_o$$

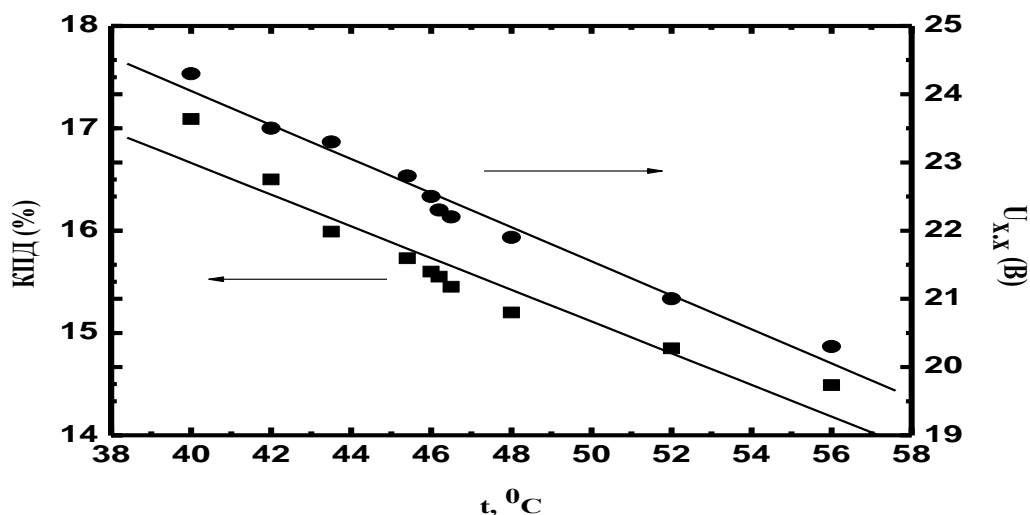
На рис.2.7. проведены зависимость эффективности преобразования, и напряжения холостого хода ФЭБ от температуры воды на выходе

коллекторной части. Видно, что эти величины линейно зависят (коэффициент корреляции  $\sim 1$ ) от температуры воды

$$U_{xx} = 34.03 - 0.25t$$

$$\eta = 22.9 - 0.15t$$

коллектора и при температуре воды  $56\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет приблизительно  $20,5\text{ В}$ , что приблизительно на  $4\text{ В}$  меньше, чем когда температуре воды на выходе составляет  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $24,3\text{ В}$ ). Уменьшение напряжения холостого хода составляет  $16,2\text{ \%}$ . В случае фотоэлектрической батареи обычной конструкции напряжение холостого хода составляет менее  $20\text{ В}$ , уменьшение напряжения составляет более  $16,9\text{ \%}$ . Ход зависимости эффективности преобразования от температуры воды на выходе коллекторной части такой же, как в предыдущем случае.



**Рис.2.7.** Зависимости КПД и напряжения холостого хода  $U_{xx}$  от температуры воды на выходе

Эффективность преобразования при изменении температуры воды на выходе коллектора от  $56\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  увеличивается примерно абсолютном значении на  $2,9\text{ \%}$  (от  $14,5\text{ \%}$  до  $17,4\text{ \%}$ ). В дальнейшем будет усовершенствована конструкция коллекторной части и увеличена площадь

контакта коллекторной части с алюминиевым листом, что должна привести к увеличению эффективности производства горячей воды и в целом комбинированной системы.

### **2.3. Повышение эффективности работы фото тепло преобразовательной установки**

В работах [36,45] показаны недостатки конструкций фото тепловых батарей, принцип действия которых основан на прямом тепловом контакте теплоносителя с тыльной стороной ФЭБ и приведена конструкция, технология изготовления и характеристики предлагаемой усовершенствованной конструкции. Солнечный водонагреватель (коллектор) в данной конструкции представляет собой медную трубку диаметром 10 мм (толщина стенки медной трубы приблизительно 1 мм), изогнутую в форме меандра. Коллектор не контактирует с фотоэлектрической батареей. Контакт с ФЭБ имеет теплоприемник из тонкого листа из оцинкованного железа (или лист из алюминия) толщиной менее 0,3 мм, с площадью равной площади фотоэлектрической батареи. Площадь контакта меандра с листом алюминия составляет порядка 5 % площади листа. Объем меандра менее 1,5 литра. При измерении параметров и испытании при температурах окружающей среды 30 - 42 °С было выявлено следующие недостатки этой конструкции.

1. Внесение дополнительного теплоприемника из листа алюминия (или из листа оцинкованного железа) выравнивает неоднородность температуры по площади. Уменьшается разброс параметров по току и напряжению термо преобразователя. Однако, тем не менее, приводит к потери тепла в самом листе.

2. Большой вес коллекторной части ФТП батареи из-за использования медной трубы;

3. Относительно малая производительность по горячей воде (10 - 12 литр час) из-за малой площади контакта коллекторной части с теплоприемником и относительно малого объема по воде коллекторной части;



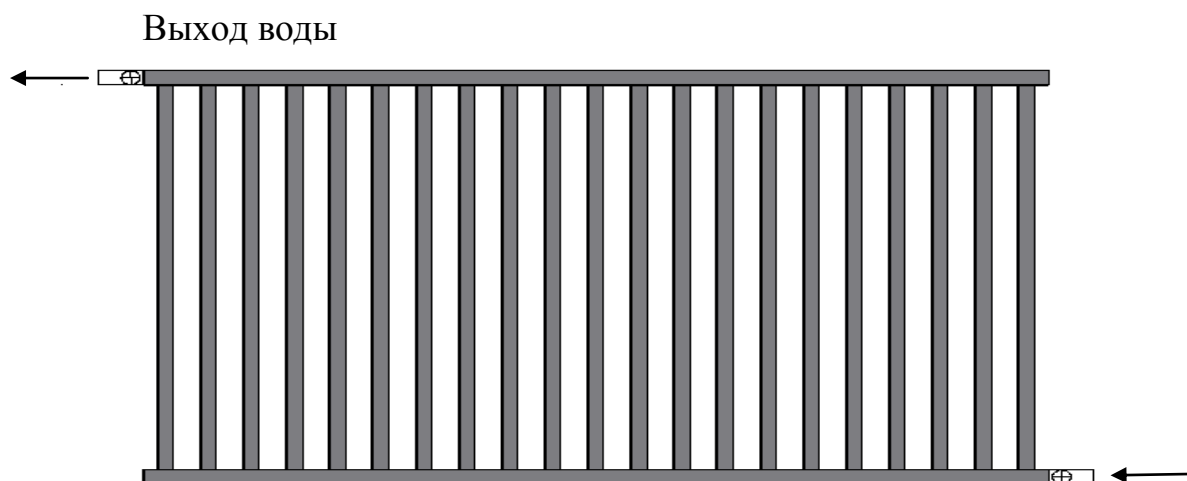
4. Использование медной трубы в качестве коллектора приводит к увеличению стоимости;

5. Использование трубы (конфигурация круглое сечение) приводит к большим тепловым потерям из-за неоднородного контакта меди с теплоприемником.

6. Использование медной трубы с конструкцией в форме меандра (длина трубы составляла 14 метров) имеет большое сопротивление к воде и часто приводит к засорению или образованию воздушных пробок.

В данной части приведены результаты измерения характеристик вариантов ФТБ на основе ФЭБ из кристаллического кремния, которые имеют комплектующие материалы с разными свойствами, в том числе, с применением стекол различной толщины и обработки поверхности. В качестве ламинирующих покрытий применяются современные полимерные EVA пленки и тонкие стекла с рифленой поверхностью. Операция ламинирования проводилась на современной установке ламинированные Китайского производства, когда время всей операции ламинации с сушкой проводится в течении часа. Ламинирования проводится при температуре  $140^{\circ}\text{C}$  при низком вакууме. Коллекторная часть представляет собой, параллельно расположенные ветви с двумя пересекающимися с верху и снизу профилями из нержавеющей стали размером 20 x 25 мм (см.Рис.2.8.), толщиной стенки 0,8-1,0 мм. Количество параллельно расположенных ответвлений составляет 27 шт. и два перпендикулярно расположенных профиля размером 20 x 30 мм для входа холодной и выхода горячей воды. Такая конструкция оказывает относительно минимальное сопротивление к протеканию воды. Использованный материал из нержавеющей стали, также предотвращает загрязнение воды из стенок трубопровода. Объем конструкции составляет чуть более 3 литров. Площадь контакта коллекторной части с тыльной поверхностью из полимера составляет более 35 % площади батареи. Для уменьшения тепловых потерь по периметру коллектор покрыт

отражающей алюминиевой фольгой. Толстый слой теплоизолирующего покрытия с тыльной стороны ФТБ закреплен листом алюминия толщиной 2 мм. Опорное устройство собрано из профилированного алюминия и снабжено механизмом ориентирования относительно Солнца. Отметим, что технология изготовления и сборки коллекторной части в данной случае конструкции гораздо легче, чем в предыдущем случае. Методика измерения характеристик ФТБ и принцип работы батареи была приведена в предыдущем параграфе /2/. Измерялись следующие характеристики ФТБ: ток короткого замыкания  $I_{sc}$  и напряжение холостого хода  $U_{xx}$  батареи, интенсивность солнечного излучения, производительность по горячей воде, температура окружающей среды и температуры воды на входе и выходе коллектора, время экспозиции.



**Рис. 2.8.** Конструкция коллекторной части фото тепловой батареи.

Для измерения параметров отобраны из нескольких готовых ФЭБ две батареи совершенно одинаковыми показателями напряжения холостого хода и тока короткого замыкания. Для достоверности результатов проведены измерения параметров в течении светового дня и изучены ход зависимостей параметров ФЭБ в течении дня от плотности потока солнечного излучения и от температуры. Затем из этих двух ФЭБ, одна комплектована коллектором (фото тепловая батарея) и другими необходимыми частями, другая оставлена без изменений (обычная ФЭБ).

После сборки проведены измерения параметров обеих батарей. При равных условиях измерения, обычная ФЭБ показывает на 0,1- 0,2 В меньше напряжения, связанное с падением напряжения на шунтирующем диоде в вмонтированное в конструкцию батареи.

Измерения проводились на солнечном полигоне Физико-технического института течение дня с 8:<sup>30</sup> часов утра до 14:<sup>00</sup> часов. Параметры обеих батарей (ток и напряжение) измерялись одновременно на соответствующих приборах, подключенных к ним. В начале измерения погода ясная, скорость ветра в течение измерений была, в пределах 2-4 м/сек. Изменение температуры окружающей среды, утром 22 °С (8:<sup>30</sup> часов), днем 31 °С (14:<sup>00</sup> часов).

Согласно методике испытания, описанной в предыдущем параграфе, после заполнения резервуара холодной водой с температурой 25 °С через час 30 минут проводили измерения. Температура воды в начальный момент проведения эксперимента составляла 51 °С. После этого был, открыт регулировочный вентиль на выходе, и вода естественной циркуляцией выходила из коллекторной части фото тепловой батареи. Производительность по воде в начале эксперимента составила 15 л/час и затем уменьшили в течение часа до 10 л час. Согласно методике измерений, описанной в предыдущем параграфе, проведены измерения параметров ФТБ и ФЭБ одновременно. В течение измерений значение токов ФТБ и ФЭБ были равными. Наблюдали изменение напряжения холостого хода ФТБ и ФЭБ по времени и по отношению температуры горячей и холодной воды. Уменьшение напряжения холостого хода ФТБ составляет до 1,3 (мин.22,3 В) В и зависит от температуры воды на выходе. В случае ФЭБ обычной конструкции напряжение холостого хода составляет менее 21,4 В, уменьшение напряжения составляет, более 2,1 В. Изменение напряжения зависит от температуры окружающей среды и скорости ветра. Ход зависимости эффективности преобразования от температуры воды на выходе коллекторной части такой же, как в

предыдущем случае. Эффективность преобразования при изменении температуры воды на выходе коллектора от 44,5°С до 30 °С увеличивается примерно абсолютном значении на 2,96 % (от 14,34 % до 17,3 %). При температуре окружающей среды 40 °С и скорости ветра 2 м/сек разница в значениях эффективности преобразования ФТБ и обычной ФЭБ может составить более 5,5 %. Отметим, что при скоростях ветра более 6-7 м/сек конструкция ФЭБ позволяет эффективное охлаждение с тыльной стороны и падения напряжения от влияния температуры существенно уменьшается до уровня напряжения ФТП батареи.

## **2.4. Выводы**

1. Приводится конструкция коллекторной части установки ФТП в форме «меандра» на основе медной трубы. Установка имеет лучшие параметрами, по сравнению с установкой ФТП с прямым контактом теплоносителя с тыльной стороной ФЭБ. Дневная производительность по горячей воде на 20 % больше ( при температуре окружающей среды 40 °С и более) по сравнению с установкой с прямым контактом теплоносителя за счет снижения потери тепла.
2. Рассмотрены результаты исследования параметров ФТП установки с конструкцией коллекторной части типа «решетка» из нержавеющей стали, в условиях солнечного освещения и показано, что производительность по горячей воде с температурой 50 °С (при температуре окружающей среды 40 °С) составляет 20-22 литр час. Сравнение электрических параметров ФТП батареи с ФЭБ показывает, что мощность обычной ФЭБ уменьшается на 30-32 %, а у ФТП батареи на 15-16 % при температурах выхода воды с коллектора 40 °С.



### III ГЛАВА

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТО ТЕПЛОВЫХ БАТАРЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ИХ ПАРАМЕТРЫ

### 3.1. Методика измерения параметров фото тепловых батарей

Фото тепло батарея включает в себя следующие основные элементы: *фотоэлектрическая батарея*, которая выполняет двойную функцию, а именно, поглощает солнечную радиацию, преобразует её часть в электричество, остальную часть энергии передаёт жидкости, поскольку является частью поглощающей поверхности *солнечного теплового коллектора*. Если рассматривать ФЭБ как элемент плоского СК, то солнечные элементы, тыльный слой герметика, полиэтиленовая пленка, являются поглощающей поверхностью СК. Прозрачные относительно СИ защитное стекло и фронтальный слой герметика, расположены над поглощающей поверхностью. Они уменьшают конвективные и радиационные потери в атмосферу. Теплоизоляцией коллектора является материал, имеющий низкую теплопроводность, предназначенный для уменьшения потерь тепла в окружающую среду. В качестве теплоизоляционного материала использовалась монтажная пена, представляющая собой полиуретановую пену, застывающую под воздействием влаги, содержащейся в воздухе. Таким образом, ФТП используется как генератор электрической энергии и как водонагреватель с динамическим охлаждением тыльной поверхности ФЭБ за счёт конвекции теплоносителя находящегося в контейнере коллектора. К преимуществам следует отнести возможность использования как прямой, так и рассеянной радиации. Эффективность генерации электрической энергии фотоэлектрической батареи во многом определяется параметрами коллекторной части фото тепловой батареи, поэтому большая часть анализа данной главы выполнена применительно к коллектору. Методика измерения параметров ФТБ обусловлена потребностями сельского жителя,

который для получения горячей воды должен заранее залить резервуар (80 - 120 литров) холодной водой. Емкость резервуара зависит от производительности горячей воды и потребности использования в течение дня. Специальное покрытие для резервуара не было предусмотрено. Однако для сохранения температуры горячей воды второй резервуар защищен теплоизолирующим покрытием с наружной стороны. Резервуар с холодной водой устанавливается выше, чем ФЭБ. Разница уровня воды в резервуаре и расположения ФЭБ определяет скорость подачи холодной воды в коллектор батареи. Проводили измерения следующих характеристик ФТБ: 1) ток короткого замыкания  $I_{sc}$ , (А); 2) напряжение холостого хода  $U_{xx}$  (В) ФЭБ; 3) мощность солнечного излучения, падающего на поверхность ФЭБ ( $Вт/м^2$ ); 4) температура тыльной поверхности фотоэлектрической батареи ( $Т^{\circ}C$ ); 5) производительность по горячей воде (л/час); 6) температура окружающей среды ( $Т^{\circ}C$ ); 7) температуры воды на входе и выходе коллектора ( $Т^{\circ}C$ ); 8) скорость ветра (м/сек); 9) время экспозиции (час).

Измерения проводились на солнечном полигоне Физико-технического института в течение дня с 10:<sup>00</sup> часов утра до 16:<sup>00</sup> часов вечера при ясной погоде скорости ветра 3-8 м/сек (после достижения температуры окружающей среды 25  $^{\circ}C$ ).

### **3.2. Испытания фото тепловых батарей в условиях солнечного освещения.**

При использовании фотоэлектрических установок, в том числе фото тепловых установок и солнечных коллекторов в Узбекистане имеются климатические факторы, отличающиеся от условий использования в других странах, и которые следует учитывать при использовании в различных регионах республики.

1. Экстремальные температурные условия, приводящие к изменению (снижению) эффективности преобразования ФЭС в летные месяцы (март-октябрь) года.
2. Высокая запыленность воздуха и почвы.
3. Отсутствие опыта использования фото тепловых батарей сельскими потребителями энергии (культура обслуживания).

Измерение параметров и испытание фотоэлектрических батарей в условиях солнечного освещения известно и освоено производителями фотоэлектрического оборудования в последние десятилетия. Поэтому при испытании фото тепловых батарей основное внимание обращается к коллекторной части ФТБ и её влиянию на параметры ФЭБ. Исследуется влияние температуры горячей и холодной воды, скорости подачи холодной воды на параметры ФЭБ и на срок службы коллекторной части фото тепловой батареи. Не допускается получение горячей воды с температурой выше 60 °С во избежание размягчения полимерных материалов коллекторной части. Не допускается использование холодной воды с различными твердыми компонентами (мутной воды), которое приводят к закупориванию полимерных трубочек и каналов воды. Давление подаваемой холодной воды в тепловой коллектор ограничивается емкостью теплового коллектора. Основным потребителем электроэнергии, вырабатываемой ФЭС в Узбекистане, являются сельские регионы. Потребность обусловлена тем, что сельскохозяйственные угодья - это большие площади с малой плотностью населения и соответственно энергопотребления. Поэтому считается экономически нецелесообразными сельские районы для увеличения централизованного электроснабжения. В сельских регионах республики в большей степени используется индивидуальные ФЭС малых мощностей с системой аккумулирования электрической энергии при помощи химических источников тока. Однако по ряду причин они пока ещё не являются широкодоступными, в том числе из-за относительной дороговизны и нежелания потребителя брать на себя



обязанности по эксплуатации сложного технического устройства. Возникает необходимость проведение периодического мониторинга параметров фотоэлектрической батареи, и оказать методическую помощь для увеличения эффективности использования **оборудования** сельскими пользователями. Индивидуальные собственники фотоэлектрических систем не имеют гарантированной защиты и надежности от рисков при остановке работы ФЭС, путем обеспечения перехода на электроснабжение из стационарной сети. В республике к настоящему времени нет центров повышения квалификации по обслуживанию фотоэлектрических систем.

### **3.3. Влияние климатических условий на эффективность работы фото тепловых батарей**

Для оценки эффективности использования ФЭС в условиях сельских регионов Узбекистана необходимо провести анализ потерь энергии, соответствие сертификации солнечных элементов и фотоэлектрических батарей условиям применения их в различных климатических зонах Республики. Рассмотрим эти различия.

#### **1. Потеря энергии ФЭБ в зависимости от ориентации к Солнцу.**

ФЭБ с неизменной ориентацией нашли широкое применение в связи с простотой конструкции, надёжностью и низкой себестоимостью /46-48/. ФЭБ ориентируются по географической широте местности для г. Ташкента приблизительно  $41^\circ$  от оси вертикали. Этот тип установок имеет низкую эффективность выработки электрической энергии из-за изменения угла падения солнечного излучения на поверхность ФЭС в течение дня. Потери энергии при таком способе ориентирования составляет 31 % в летнее время и до 46 в зимний период года /46 /.

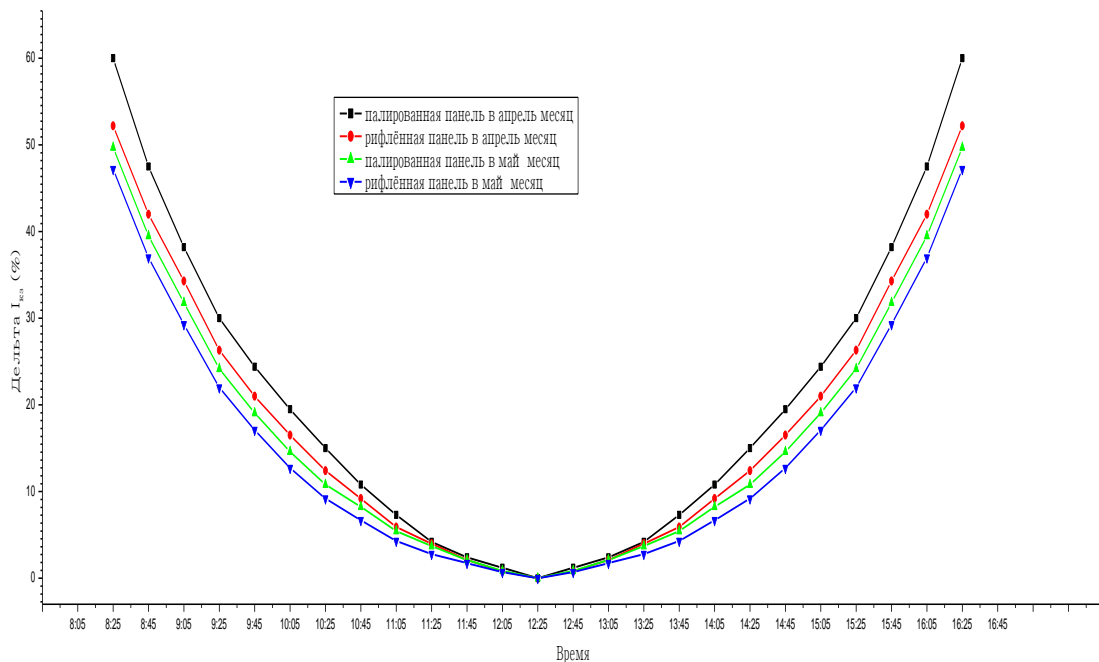
**2. Сертификация СЭ и ФЭБ проводится при помощи имитаторов СИ согласно Международным стандартам в условиях АМ 1.** Условия АМ 1 – излучение падает перпендикулярно поверхности СЭ или модуля с плотностью  $1000 \text{ Вт/м}^2$  и температуры  $25^\circ\text{C}$ . В случае использования ФЭБ

в условиях сельских регионов республики, условия АМ 1 не соблюдаются. Угол падения СИ меняется от восхода до захода Солнца, что приводит к изменению плотности излучения. Ближе всего к этим условиям подходит время полдень, когда плотность падающего СИ максимальна. При применении системы слежения ФЭБ за солнцем, даже в условиях экватора, мощность ФЭБ составляет 85-87 % от значения приведенной в паспорте, что связано с изменением мощности СИ от восхода до захода Солнца. Уменьшение потери энергии можно достичь при ориентировании ФЭБ относительно положения зенита Солнца. Методика определения потерь энергии основана на измерении токов короткого замыкания ФЭБ, в случае использования следящей системы и ФЭБ неподвижной и наведенной в точку зенита небо. Выходную мощность СЭ можно оценить по формуле:

$$P = I \cdot U = \xi \cdot I_{\text{к.з.}} \cdot U_{\text{хх}} \quad (1)$$

$U_{\text{х.х}}$  - напряжение холостого хода;  $I_{\text{к.з.}}$  - ток короткого замыкания;  $\xi$  - коэффициент заполнения ВАХ СЭ. При освещении солнечным излучением  $U_{\text{х.х}}$  достигает насыщения при плотностях солнечного излучения  $\sim 400 \text{ Вт/м}^2$  в СЭ с эффективностью более 16 %, и далее меняется очень слабо. Для г. Ташкента в весенние и летние месяцы такая освещенность наблюдается в начале восхода Солнца. Поэтому, при измерении на ясном Солнце величину  $U_{\text{хх}}$  можно принять постоянной. Значение  $\xi$ , также при ясной погоде с изменением солнечной освещенности практически не меняется. Зависимости мощности от плотности СИ при ясной погоде определяется величиной тока короткого замыкания  $I_{\text{к.з.}}$ . Предлагаемая методика измерения потерь энергии в ФЭБ основана на одновременном измерении тока короткого замыкания двух ФЭБ: ФЭБ ориентированном в точку зенита неба и зафиксированном в этом положении ( $I_{\text{к.з. ст.}}$ ), и ФЭБ непрерывно следящем за солнечным диском ( $I_{\text{к.з. сл.}}$ ). Относительная потеря энергии в процентах рассчитывается согласно выражению

$$\Delta = 100 (I_{\text{к.з.}\cdot\text{сл.}} - I_{\text{к.з.}\cdot\text{ст.}}) / I_{\text{к.з.}\cdot\text{сл.}} \quad (2)$$



**Рис.3.1.** Зависимость потери энергии ФЭБ от времени суток для апреля и мая месяца 2017 г., изменение температуры окружающей среды 27-31 °С, скорости ветра 0,5-1,5 м/сек, относительной влажности 25-32 %. средние значения потерь энергии: ФЭБ с полированной поверхностью стекла, апрель месяц -20,8%, с рифленой поверхностью – 18, 1%; май месяц, ФЭБ с полированной поверхностью стекла – 16,8 %, с рифленой поверхностью – 15, 3%; июнь, ФЭБ с полированной поверхностью стекла – 14,9 %, с рифленой поверхностью – 13, 8%;

На рис.3.1. приводится зависимость потери энергии ФЭБ в течение дня. Она симметрична относительно точки прохождения зенита Солнцем, соответствующего 12 часам 20 минутам (19 апреля 2017 г.). Используются две батареи; 1- ФЭБ с защитным стеклом с рифленой поверхностью с эффективностью СЭ 16, 4 % (мощность 175 Вт), 2- ФЭБ с защитным стеклом с полированной поверхностью с эффективностью СЭ 17, 6 % (мощность 185 Вт). Различие в эффективности ФЭБ со стеклом с рифленой и полированной поверхностью составляет 1,2 %. Потеря энергии в ФЭБ со стеклом с рифленой поверхностью меньше, так как коэффициент

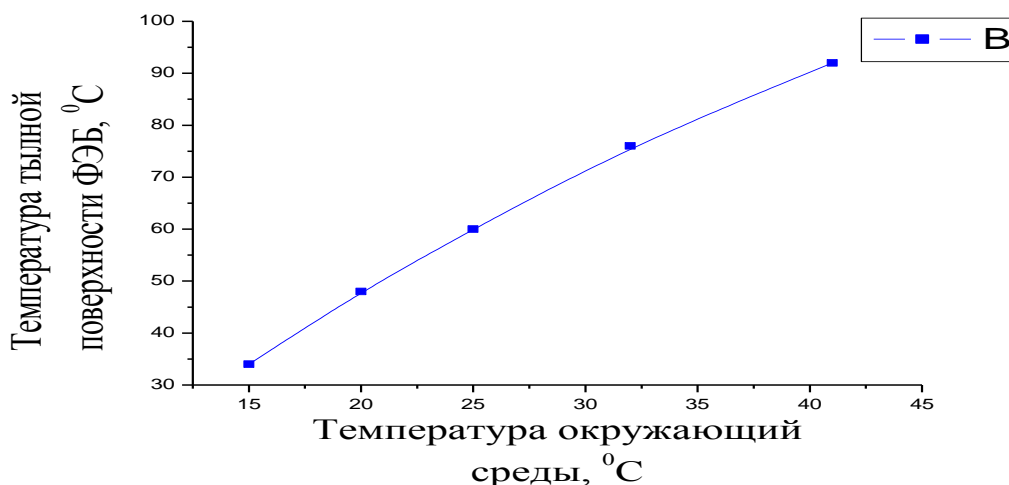
отражения излучения при уходе Солнца от ориентации относительно зенита меньше приблизительно на 4-6 %. Это подтверждается в экспериментах с использованием ФЭБ с равными эффективностями преобразования. При увеличении ухода ФЭБ относительно точки зенита Солнца увеличивается разница угла падения солнечного излучения относительно угла падения условия АМ 1, что приводит к увеличению коэффициента отражения поверхности стекла. Для рифленой поверхности стекла коэффициент отражения меньше, чем для полированной поверхности. В случае измерения зависимости относительной потери энергии в марте месяце, без использования следящей системы потери энергии будут больше из-за увеличения коэффициента отражения солнечного излучения от изменения угла падения. Для измерения в мае месяце потери меньше. В зимние месяцы зависимость потери энергии относительно зенита неба, без использования системы слежения является больше, чем в летние месяцы. Среднее значение потерь энергии в летние месяцы (апрель - сентябрь) составляет 15-17 %, а зимние месяцы более 22 %. Таким образом при использовании ориентирования ФЭБ относительно зенита без затраты энергии один раз в несколько дней, потери энергии снижаются почти в два раза, чем при установлении массивов панелей ФЭС по географической широте местности.

Эффективность преобразования энергии солнечного излучения в СЭ составляет 17 – 19 %. Эффективность использования их определяется климатическими условиями. Это касается СЭ показатели, которых в экстремальных условиях жаркого климата Центральной Азии ухудшаются, в том числе КПД ФЭБ на основе кристаллического кремния уменьшается более чем на 40 %. В летнее время температура воздуха в тени достигает  $\geq 45$  °C, а на поверхности ФЭБ  $\geq 65$  °C. Коэффициент отражения от защитного стекла и поверхности СЭ в ФЭБ составляет менее 8 %. До 19 % поглощенного излучения преобразуется в электрическую энергию, оставшаяся часть в тепло и нагревает структуру СЭ. В условиях

эксплуатации, уменьшается напряжения холостого хода ФЭБ, вследствие чего существенно снижается ток зарядки аккумуляторной батареи. В условиях сельских регионов второй половины мая по первую половину сентября снижение эффективности ФЭС составляет до 50 % от паспортного значения. Таким образом, при использовании ФЭС в условиях жаркого климата эффективность преобразования составляет не более 8 - 10 %. Остальная часть (80 - 85 %), поглощенной энергии СИ, превращается в тепло, приводящее к ухудшению параметров установки ФЭС.

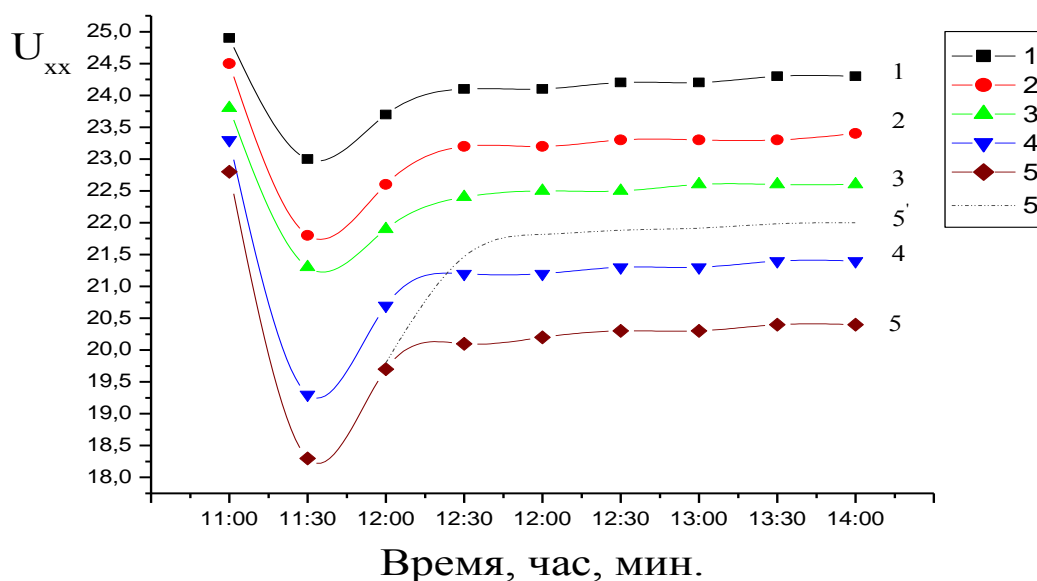
**3. Фото тепловые батареи с воздушным охлаждением.** ФЭС большой мощности строят в местах с высокой годовой инсоляцией. В таких местах количество воды ограничена или её добыча требует существенных финансовых затрат и соответствующие амортизационные отчисления для дальнейшего содержания. Поэтому повышения эффективности ФЭБ в условиях отсутствия воды является актуальной задачей. Рассмотрим результаты исследования использования фото тепловых батарей (ФТБ) с воздушным охлаждением при разных температурах окружающей среды и пути повышения теплоотдачи тыльной поверхности ФЭБ. Использована установка с боковой отражательной плоскостью для формирования однородности освещенности СИ поверхности ФЭБ /50/. Отражающая пленка с  $R=0,5$  дала возможность увеличения плотности потока СИ на поверхности ФЭБ до 1,4 раза. На тыльной поверхности ФЭБ установлены датчики для проведения мониторинга температуры [49]. Перпендикулярно к поверхности ФЭБ установлены 8 вентиляторов [50], которые работают в автоматическом режиме и включаются при нагреве тыльной поверхности выше заданной температуры. В этом случае контактирующим с тыльной поверхностью ФЭБ материалом является воздушный поток, создаваемый вентиляторами. На рис.3.2. приведена зависимость температуры тыльной поверхности ФЭБ от температуры окружающей среды. Температура тыльной поверхности ФЭБ с увеличением температуры окружающей среды растет

медленно. При температуре окружающей среды более 40 °С температура тыльной поверхности ФЭБ достигает более 90 °С.



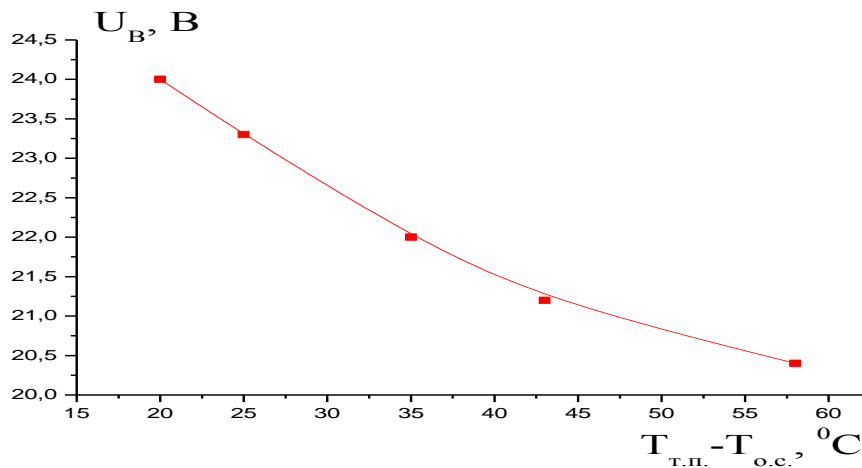
**Рис.3.2.** Зависимость температуры тыльной поверхности ФЭБ от температуры окружающей среды

На рис.3.2. приведена зависимость напряжения холостого хода ФТБ от времени при разных температурах окружающей среды. С момента включения коллектора с вентиляторами происходит увеличение напряжения холостого хода, которое ограничивается температурой окружающей среды, и определяет температуру потока воздуха, уносящего тепловую энергию с тыльной стороны ФЭБ. Чем меньше температура окружающей среды, тем больше обеспечивается рост напряжения. При высоких температурах окружающей среды, когда разность температур тыльной поверхности ФЭБ и температуры окружающей среды мала, поток уносимого тепла ограничен и поэтому значение напряжения холостого хода меньше. В условиях южных регионов республики, когда температура достигает 40 °С и выше эффективность коллектора с воздушным охлаждением снижается.



**Рис.3.3.** Зависимость напряжения холостого хода ФТБ от времени при разных температурах окружающей среды, 1- 15 °С, 2- 20 °С, 3- 25°С, 4-32°С, 5-41°С, 5 штрих линия - при впрыскивании в коллектор паров воды.

На рис.3.4. приведена зависимость напряжения  $U_v$  (прирост значения напряжения при воздействии воздушного коллектора) ФТБ от разности температур тыльной поверхности ( $T_{т.п.}$ ) ФЭБ и окружающей среды ( $T_{о.с.}$ ). Зависимость  $U_v$  ФТБ от разности температур тыльной поверхности является нелинейной и с увеличением разницы температур нелинейность проявляется более отчетливо. Эффективность ФТБ с воздушным охлаждением (напряжение  $\Delta U_v = U_{xx} - U_t$ ) зависит от разности  $\Delta U_v$  нелинейно. Чем больше температура окружающей среды, тем меньше поток уносимого тепла за пределы коллектора. Однако, даже при таких температурах дополнительная мощность, генерируемая за счет использования воздушного охлаждения применением вентиляторов больше, чем электрическая мощность потребляемые вентиляторами.



**Рис.3.4.** Зависимость напряжения  $U_B$  ФТБ от разности температур тыльной поверхности ФЭБ и окружающей среды ( $T_{т.п.} - T_{о.с.}$ ).

ФТБ с воздушным охлаждением являются эффективными источниками электрической энергии в случае отсутствия воды в регионах с жарким климатом.

**4. Фото тепловые установки с водяным охлаждением.** При проектировании ФТБ необходимо учитывать влияние на ее параметры конвективного теплообмена [51]. Как было показано, если температура окружающей среды более  $30^\circ\text{C}$ , то изменение температуры ФЭБ с увеличением скорости ветра незначительно (менее 20 %) и для эффективной работы ее необходимо охлаждать.

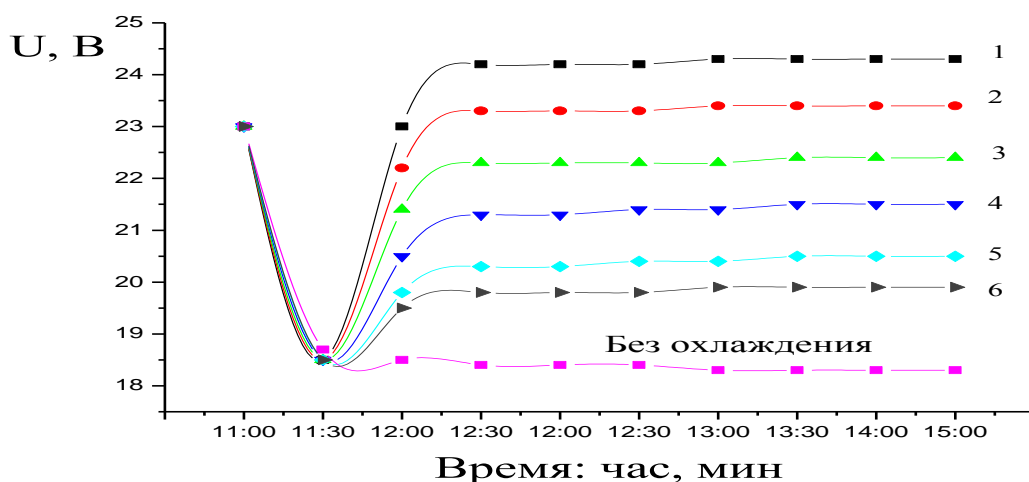
$$Q_c = 2\alpha(T - T_o) \quad (3)$$

$T$  - температура ФЭБ при термодинамическом равновесии,  $T_o$  - температура окружающей среды (воздуха),  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи. Тыльная поверхность ФТБ имеет тепловую защиту, влияние ветра исключается, и съем тепла с тыльной стороны ФЭБ. Исследовано влияния температуры воды на входе в коллектор при заданной температуры тыльной поверхности ФЭБ на электрические параметры ФТБ. Были разработаны ФТБ с тепловым коллектором на основе полимерных трубок



/51-54/. Установлено, что эффективность коллекторной части ФТБ, определяется эффективностью теплообмена между тыльной поверхностью ФЭБ и контактирующего с нею коллектора с теплоносителем. Тыльная поверхность ФЭБ покрыта защитной полимерной пленкой и к ней в механическом контакте находятся полимерные трубки коллектора с водой. В такой сложной системе защитная пленка – воздух – полимерная трубка – вода в процессе конвективного теплообмена потери неизбежны /51/. Поэтому, температура тыльной поверхности ФЭБ и воды на выходе из коллектора различаются на 10 – 14 °С в зависимости от типа материала коллектора.

На рис.3.5. приведена зависимость напряжения холостого хода ФТБ от времени при разных температурах воды, подаваемой в коллектор.

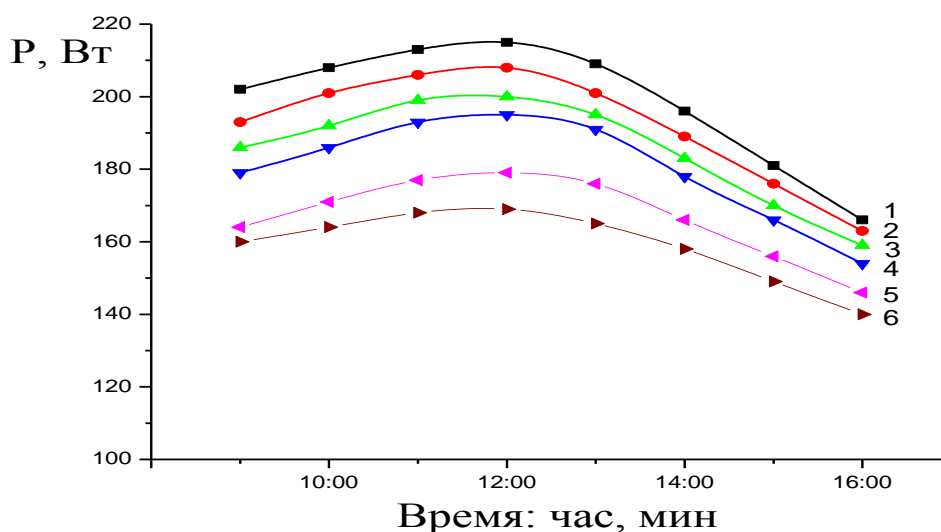


*Ри*

*с.3.5. Зависимость напряжения холостого хода ФТБ от времени при разных температурах воды, 1-15 °С, 2- 20 °С, 3 – 25 °С, 4 – 32 °С, 5 – 41 °С, 6 – 46 °С.*

С момента включения коллектора следует процесс восстановления напряжения. Увеличение напряжения холостого хода ограничивается влиянием температуры воды входящей в коллектор, уносящей тепловую энергию с тыльной стороны ФЭБ конвективным теплообменом. Дальнейшее изменение напряжения холостого хода зависит от плотности падающего СИ и температуры окружающей среды. При температурах

подаваемой воды в коллектор 15 - 20 °С напряжение восстановления соответствует значению напряжении холостого хода ФЭБ, измеренной при температуре 25 °С в условиях АМ 1,5 и даже больше (при 15 °С) данного значения. При увеличении температуры воды в коллекторе происходит снижение напряжения восстановления коллектора из-за уменьшения разности температур тыльной поверхности и воды, и соответственно уменьшается поток тепла уносимое водой. При температурах воды 40 °С и более напряжения восстановления снижается до 19 В и менее. В случае использования ФТБ в режиме автономных источников энергии температуру входящий в коллектор воды необходимо выбрать таким образом, чтобы напряжения была достаточной для эффективного аккумулирования электрической энергии в гелиевых аккумуляторах. Так как при использовании гелиевых и щелочных аккумуляторов для достижения полной зарядки необходимо в режиме зарядки иметь нагрузку не менее 17 В. На рис.3.6. приведена зависимость мощности ФТБ от времени при разных температурах воды в коллекторе.



**Рис.**

**3.6. Зависимость мощности ФТБ от времени при разных температурах**

воды в коллекторе, 1-15 °C, 2- 20 °C, 3 – 25 °C, 4 – 32 °C, 5 – без охлаждения, 6 – 41 °C, 7 – 46 °C.

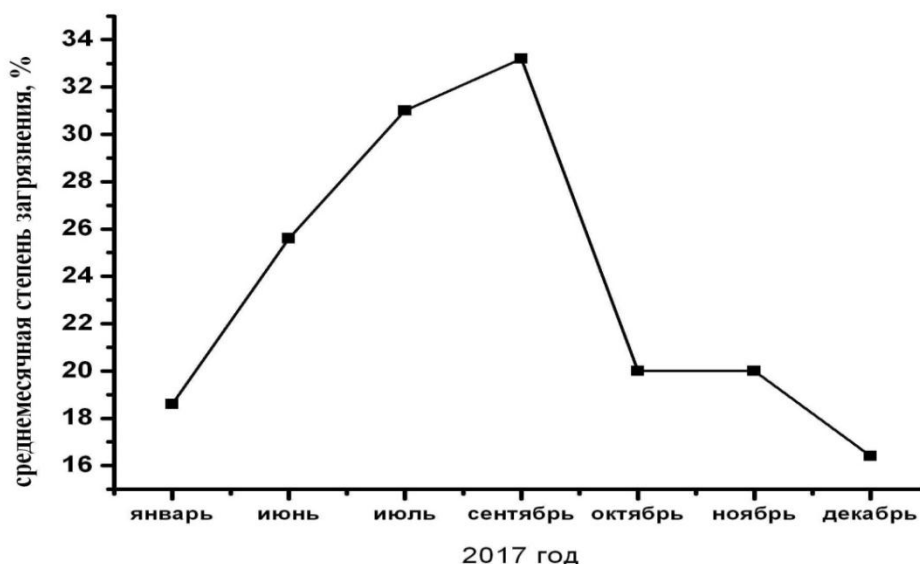
Подача воды в коллектор с температурой 15 - 25 °C приводит к увеличению выработке электрической мощности до 200 Вт - 215 Вт. При увеличении температуры воды в коллектор до 41 °C мощность уменьшается до 181 Вт. При температуре воды в коллекторе 45 °C, вырабатываемая мощность снижается до 167 Вт. В этих двух случаях при использовании ФТБ в режиме автономного источника электропитания с аккумуляторной системой является оправданной, так как из-за достаточно высокого напряжения (19 В и более) гарантирует зарядку кислотных аккумуляторов при напряжениях, приведенных на рис.5. В заключении отметим, что в ФТБ с тепловыми коллекторами следует использовать холодную воду с температурой до 32 °C, что дает возможность получения электрической мощности не менее 180 Вт при напряжениях 21,5 В.

**5. Влияние загрязнения на параметры ФЭС.** Основными источниками пыли и соли на территории Республики является высохшая часть Аральского моря, поверхности соленых сбросовых озер и солончаков. Загрязнения поверхности ФЭБ атмосферной пылью приводит к снижению мощности на 30 % и более /55-58/. Пыль имеет размеры которой меняется от долей до сотни микрометров /59-61/. Изменяются не только размеры пыли, но и химический состав. Частицы пыли растворяются в дождевой воде, вступают в химическую реакцию с поверхностью ФЭБ, и на ней остаются следы «химических» ручейков и пятен. Влияние воды на оптические свойства стеклянной поверхности зависит от технологии производства стекла /58/. Исследования проводились на специально созданном стенде /54/, который был расположен на высоте 6 м в момент прохождения Солнцем зенита. Ранее было установлено, что зимой и ранней весной коэффициент полезного действия (КПД) уменьшается на 6-8 %, т.к. концентрация пыли в воздухе

незначительна и поверхность ФЭБ очищается за счет дождя и снега. Концентрация пыли резко увеличивается во второй половине мая и не уменьшается до конца ноября. Поэтому измерения были начаты со второй половины мая. Ток короткого замыкания и напряжение холостого хода солнечного элемента (СЭ) измеряли стандартным методом. Интенсивность потока солнечной радиации измеряли прибором PL-1105M фирмы “Votcraft”. Степень загрязнения – уменьшение коэффициента полезного действия  $\Delta\eta$  рассчитывали по формуле /54/:

$$\Delta\eta = 1 - \frac{\Phi_1}{\Phi_0} \quad (4)$$

$\Phi_0$  – измеренный поток солнечной радиации «перед» стеклом,  $\Phi_1$  – измеренный поток солнечной радиации «после» стекла. Результаты измерений представлены на рис. 3.7. Видно, что высокая температура и запыленность воздуха летом и осенью (до начала сезона дождей) приводит к уменьшению КПД СЭ на 20 - 34 % (степень загрязнения составляет 20 - 34 %). По нашему мнению, причиной увеличения концентрации пыли в воздухе являются не только постоянно дующие ветры с Аральского моря и солончаковых озер, но и сельскохозяйственные работы, которые начинаются весной и заканчиваются поздней осенью.

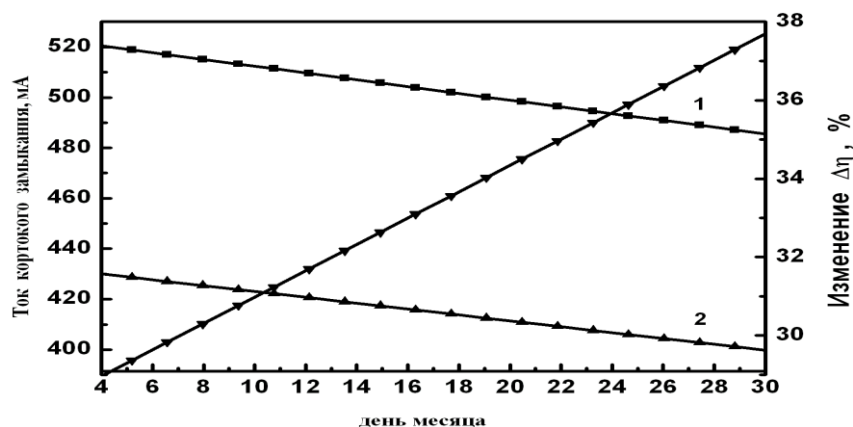


*P*

### *ис.3.7. Изменение коэффициента полезного действия СЭ в зависимости от времени года*

В этот период времени поверхность ФЭБ нужно очищать чаще, чем поздней осенью или зимой. Чтобы делать окончательные прогнозы и давать практические рекомендации, необходимы многолетние наблюдения. Поэтому полученные результаты нужно рассматривать, как предварительные. ФЭБ собираются из СЭ как на гладком, так рифленом стекле. Поэтому были проведены эксперименты по изучению влияния загрязнения на параметры ФЭБ с рифленой поверхностью.

Результаты измерения тока короткого замыкания ФЭБ с гладкой и рифленой поверхностью приведены на рис. 3.8.



*Рис.3.8. Зависимость тока короткого замыкания ФЭБ (сентябрь): 1-рифленое стекло; 2 – гладкое стекло.*

С увеличением загрязнения КПД ФЭБ уменьшается. Параллельность прямых 1 и 2 на рис.3.3. означает, что степень загрязнения у них одинаковая, а разница в  $I_{кз}$  обусловлена отличием оптических свойств поверхности стекла ФЭБ. Действительно, поверхность стекол (гладкое стекло), подвергнутая механической полировке, всегда имеет трещиноватый слой, толщина которого, в зависимости от условий полировки, может достигать десятков и сотен нанометров. Стекла, вытянутые из расплава или подвергнутые ионной полировке, такого слоя не имеют [55]. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Уменьшение КПД в летнее время из-за загрязнения поверхности ФЭБ составляет 30 и более процентов, поэтому необходим ежегодный мониторинг количества и состава выпадающих осадков в местах перспективных для строительства фотоэлектрических станций (ФЭС).
2. Результаты ежегодного мониторинга крайне важны при проектировании ФЭС, т.к. в проекте будут заложены возможные способы очистки поверхности ФЭБ и будут определены реальные экономические показатели.

**6. Сетевые ФЭС большой мощности.** ФЭС подключенные в высоковольтные линии электропередачи («сетевые» ФЭС) в условиях Узбекистана не являются эффективными по ряду причин. Во-первых, использование «сетевых» ФЭС большой мощности (мегаватты и более) без использования систем аккумулирования электрической энергии, подключенных к линиям электропередачи (ЛЭП) высокого напряжения, как принято в странах Европы является не рентабельной. Это связано, как с протяженностью линий ЛЭП и относительно большими потерями энергии, так и с климатическими условиями эксплуатации (температура и запыленность). Во-вторых, обслуживание, эксплуатация и устранение

потери энергии в таких фотоэлектрических станциях требует существенные финансовые затраты и амортизационные отчисления.

### **3.4. Исследование свойств фото тепловых батарей повышенной эффективности с полным тепловым контактом**

В долинах Узбекистана, вопросы электроснабжения стоят достаточно остро. Прежде всего, потребители страдают от частых отключений электроэнергии вследствие плановых мероприятий и аварийных ситуаций. Нередко наблюдаются провалы напряжения, особенно на тупиковых ответвлениях сети. Это связано с резко возросшими нагрузками в жилом секторе и низкой мощностью сельских линий электропередач. Вновь, осваиваемые земельные участки довольно долго, не имеют централизованного электроснабжения из-за высокой стоимости и строительства линий электропередач и ограниченной мощности трансформаторных подстанций. В условиях рыночной экономики подвод электроэнергии от энергосистемы (установка и монтаж трансформатора, распределительных сетей, средств защиты и т.д.) оплачивает потребитель (деханское или фермерское хозяйство и т.д.). Стоимость 1 км линии электропередач (ЛЭП) в зависимости от условий прокладки трассы сегодня составляет более 10000 долл. США, а само строительство требует проектно-сметной документации и занимает длительное время. Поэтому в последние годы все чаще в сельских населенных пунктах обращаются к автономным системам электроснабжения.

В качестве АСЭ в сельских регионах используются фотоэлектрические установки с системой накопления энергии. Однако, в фотоэлектрических батареях в летнее время из-за высоких температур нагрева в условиях Узбекистана существенно уменьшается эффективность

преобразования, и вырабатываемая мощность снижается на 40 % и более. Основной проблемой, препятствующей ускоренному внедрению в наземную энергетику ФЭУ, является низкий КПД и высокая стоимость СЭ [45]. Одним из вариантов решения этой проблемы является использование комбинированных установок солнечной энергии. В Физико-техническом институте НПО «Физика-Солнце» разработаны комбинированные фото тепловые батареи (ФТБ), тыльная поверхность ФЭБ в которых охлаждается разными методами, потоком воды или воздуха [62, 49-50]. В зависимости от условия наличия ресурсов воды или других теплоносителей могут использоваться ФТБ с разными типами коллекторов. В работе [5] рассматриваются влияние температуры на эффективность преобразования фото тепловых батарей (ФТБ) с разной конструкцией тепловых коллекторов и воздушным охлаждением. Сравнивается эффективность разных конструкций ФТБ переносных вариантов. Разработаны три варианта конструкций фото тепловых батарей: с прямым тепловым контактом теплоносителя с тыльной поверхностью ФЭБ; с буферным теплоприемником между ФЭБ и тепловым коллектором; с прямым преобразованием тепловой энергии ФЭБ в электрическую энергию при помощи термоэлектрических преобразователей [6-8]. Установлено, что эффективность коллекторной части ФТБ во всех случаях, определяется эффективностью теплообмена между тыльной стороной ФЭБ и контактирующего с нею материала коллектора. Основная причина низкой эффективности коллекторной части малая площадь контакта с поверхностью ФЭБ. Наряду с этим, большой вес, цена материала, сложная технология изготовления коллекторной части ФТБ при использовании металлических коллекторов делает её неконкурентоспособной с ФЭБ традиционной конструкции.

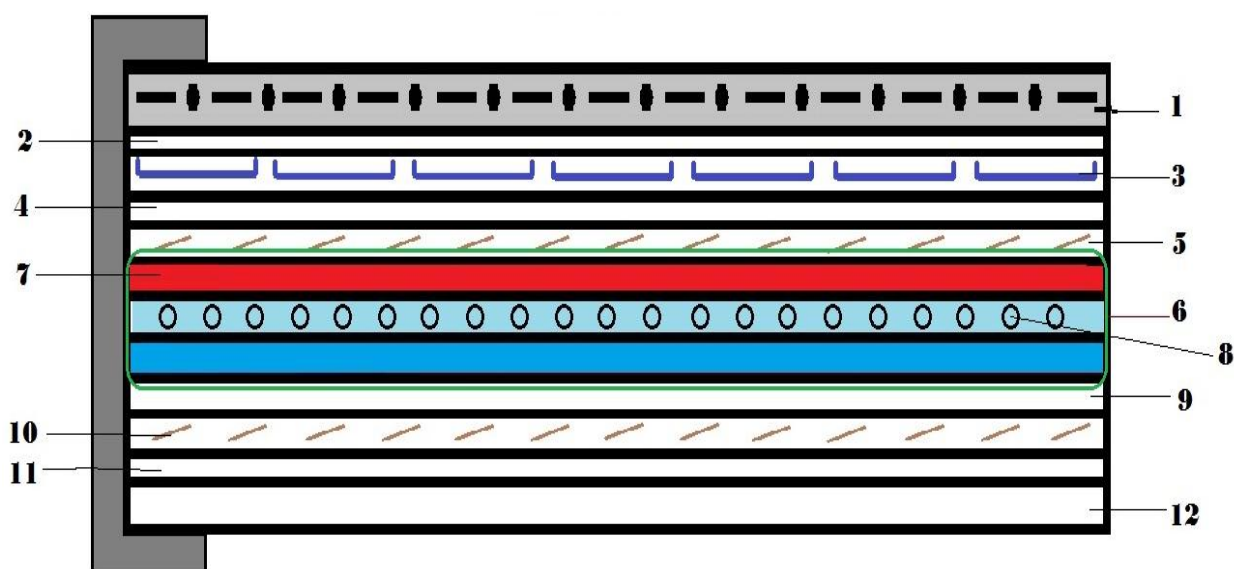
В последние годы появилась возможность применения полых волокон являющихся полимерными трубками малого ~1-3 мм диаметра. Было показано, что такие устройства могут эффективно отводить тепло от



нагретой поверхности, и могут быть использованы для охлаждения электронного оборудования, в том числе и солнечных коллекторов [9]. Очевидно, что применение полимерных трубок малого диаметра приведет к увеличению площади теплового контакта, к снижению стоимости, веса и затраты на изготовления ФТБ. Разработана технология монтажа и закрепления полимерных трубок к входной и выходной трубе фото тепловой батареи. Тыльная поверхность ФЭБ покрыта защитной полимерной пленкой и к ней в механическом контакте находятся полимерные трубки коллектора с водой. В такой сложной системе защитная пленка тыльной поверхности ФЭБ – воздух – полимерная трубка – вода- полимерная трубка, потери в процессе конвективного теплообмена неизбежны /6/. Испытания ФТБ в условиях солнечного освещения показали, что данная конструкция теплового коллектора превосходит, параметры конструкции на основе металлических профилей, по производительности горячей воды 3- 4 раза, а электрическая мощность увеличивается на 25-30 % при температурах окружающей среды 35-40 °С.

Тем не менее, широкое применение данной конструкции фото тепловой батареи в сельских регионах республики испытывает большие трудности. Основной причиной является сложность технологии изготовления теплового коллектора и низкой надежности конструкции, связанная с формированием воздушных пробок и утечек воды. В данной работе приводятся результаты исследования параметров ФТБ с новой конструкцией теплового коллектора. На рис. 3.9. приведена структура фото тепловой батареи. В основу конструкции легла ранее разработанная нами ФЭБ, собранная из 40 последовательно соединенных СЭ на основе поликристаллического кремния с КПД  $\sim 16\%$  и размерами  $156 \times 156 \times 0,2$  мм. В условиях АМ1 мощность ФЭБ составила 170 Вт, напряжение холостого хода 23.8 В, а ток короткого замыкания более 8.5 А. К тыльной стороне ФЭБ приклеен защитный слой из полиамидной пленки. В отличие от предыдущих конструкций тепловой коллектор имеет полимерную

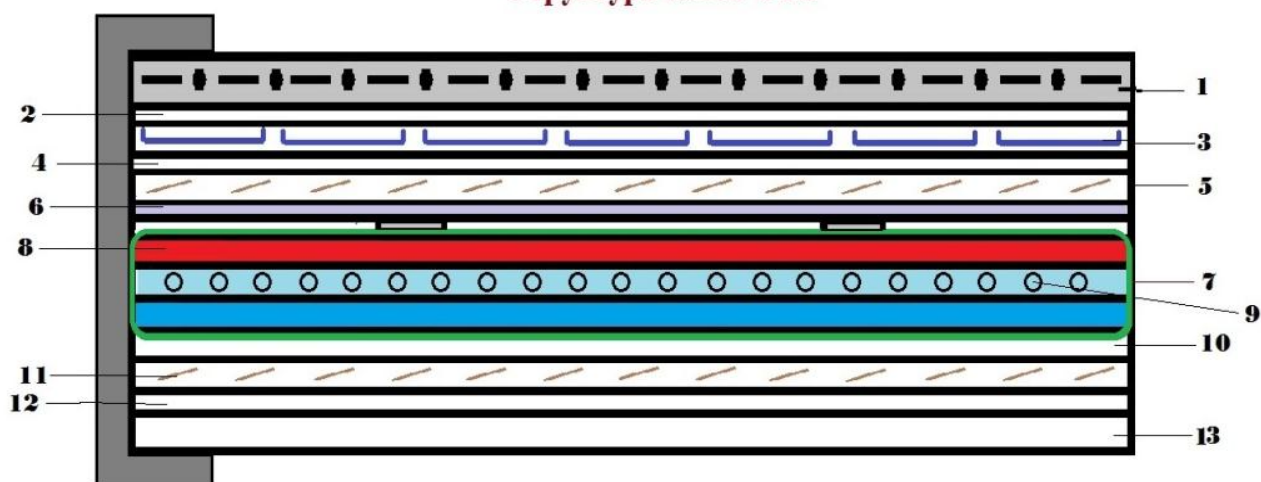
оболочку (гидр защита). Диаметр полимерных трубок 8-10 мм и их количество уменьшено до 13-15 штук. Тепловой контакт обеспечивается по всей тыльной поверхности фотоэлектрической батареи (~ 95 %). В данной конструкции ФТБ холодная вода охлаждает тыльную поверхность ФЭБ, при тепловом контакте полимерными трубочками, и через тепловой контакт полимерной оболочки с тыльной поверхностью ФЭБ. Полимерная оболочка одевается на каркас из полимерных трубочек и закрепляется к несущей конструкции ФЭБ и является защитой от утечки воды из полимерных трубочек. Объем теплового коллектора 5 литров. Для уменьшения тепловых потерь по периметру коллектор покрыт отражающей алюминиевой фольгой. Толстый слой теплоизолирующего покрытия с тыльной стороны ФТБ закреплен листом алюминия толщиной 2 мм. Опорное устройство собрано из профилированного алюминия и снабжено механизмом ориентации относительно Солнца.



**Рис.3.9.** Структура слоев фото тепловой батареи.

1- Стекло фронтальное; 2-Герметик; 3- СЭ; 4-Герметик; 5-Защитное полимерное покрытие; 6-Полиэтиленовая «Гидрозащита»; 7- Труба для горячей воды; 8-Полимерные трубки; 9- Труба для подачи холодной воды; 10-Уплотнитель; 11- Теплозащита; 12-Задняя стенка.

### Структура слоев ФТБ



В такой системе передача тепла от тыльной поверхности ФЭБ к воде по времени существенно уменьшается и время восстановления напряжения холостого хода снижается на 30-40 %. Однако, эксперименты показали, что возникает другая проблема. Из-за увеличения давления столба воды, оказываемое фронтальному стеклу увеличивается объем коллектора. Визуально наблюдается деформация фронтального защитного стекла. В связи с этим была введена специальная защита соразмерное плоскости фронтального стекла, являющаяся одновременно приемником тепла от тыльной поверхности ФЭБ. Материалом теплоприемника является лист алюминия с толщиной 1 мм с ребрами «жесткости» (Рис.3.10.).

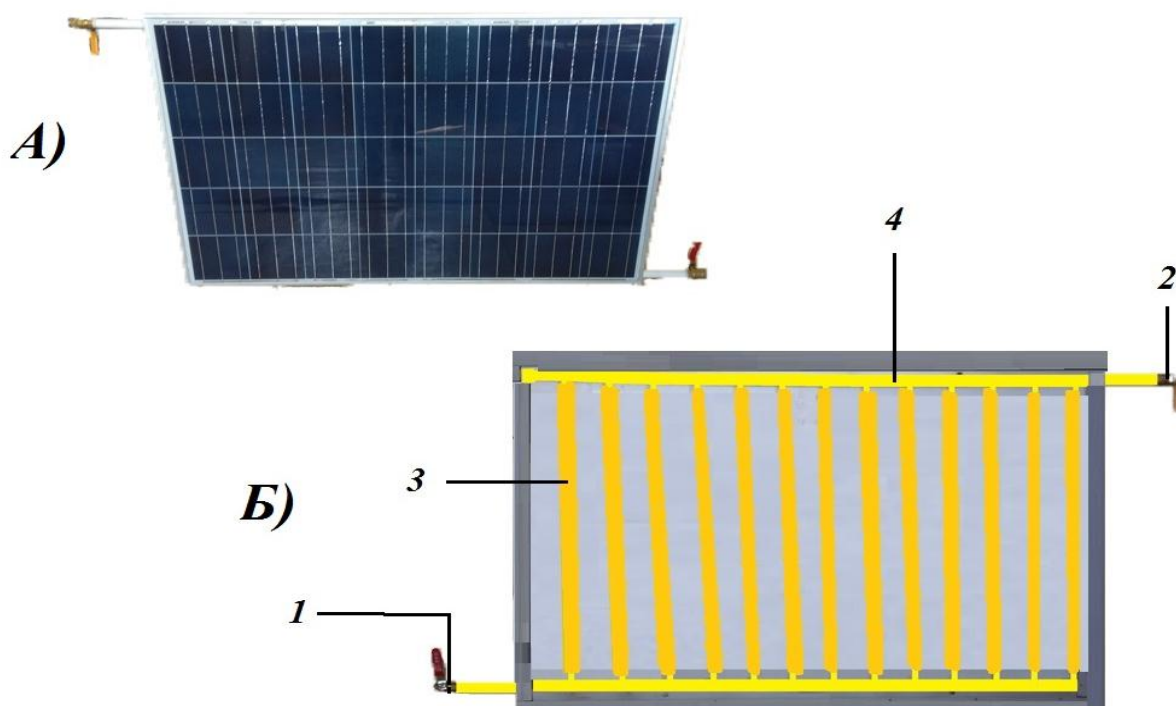
**Рис.3.10.** Структура слоев усовершенствованной фото тепловой батареи.

- 1- Стекло фронтальное; 2-Герметик; 3- СЭ; 4-Герметик; 5-Защитное полимерное покрытие; 6- теплоприемник с ребрами «жесткости»; 7-Полиэтиленовая «Гидрозащита»; 8- Труба для горячей воды; 9-Полимерные трубки; 10- Труба для подачи холодной воды; 11-Уплотнитель; 12- Теплозащита; 13-Задняя стенка.

Однако, эксперименты показали, что возникает другая проблема. Из-за увеличения давления столба воды, оказываемое фронтальному стеклу

увеличивается объем коллектора. Визуально наблюдается деформация фронтального защитного стекла. В связи с этим была введена специальная защита соразмерное плоскости фронтального стекла, являющаяся одновременно приемником тепла от тыльной поверхности ФЭБ. Материалом теплоприемника является лист алюминия с толщиной 1 мм с ребрами “жесткости” (Рис.3.10.).

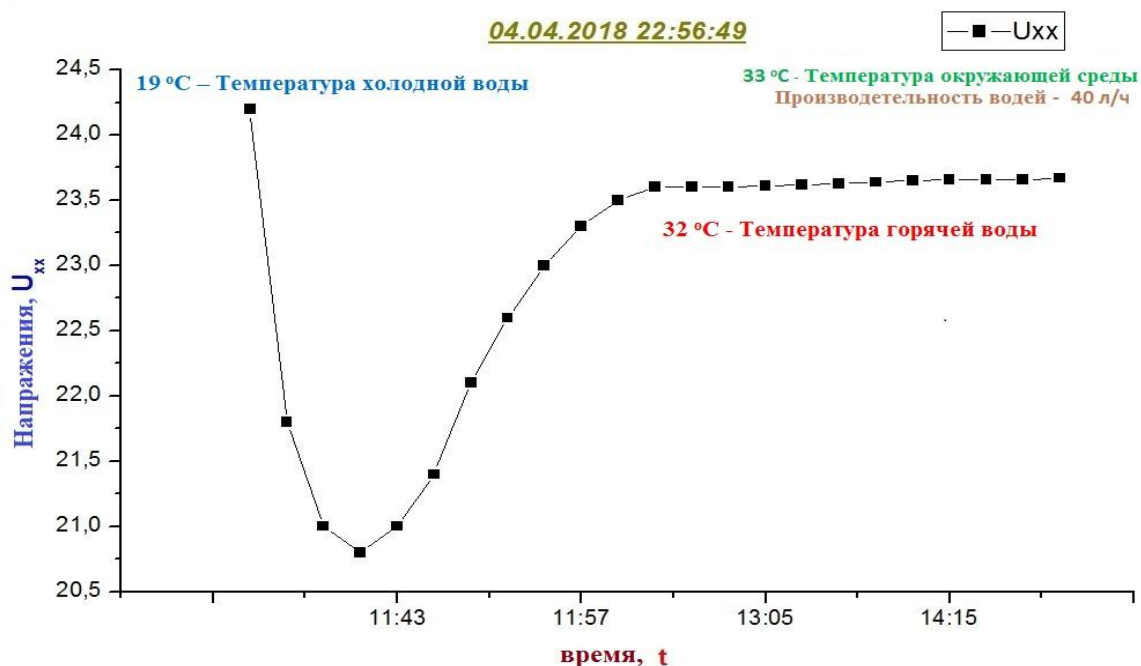
Емкость теплового коллектора в усовершенствованном коллекторе уменьшается более, чем в 2 раза (приблизительно до 3 л) и визуально деформация фронтального стекла не наблюдается. Производительность по горячей воде при фиксированном значении скорости подачи холодной воды не меняется.



**Рис. 3.11.** Фото тепловая батарея, вид спереди и с тыльной стороны без задней стенки. А) ФТБ вид спереди; Б) ФТБ вид с тыла без задней стенки. 1- вход для холодной воды, 2- выход для горячей воды, 3- полимерные трубки, 4- трубки для холодной и горячей воды

На рис.3 приведена вид разработанной фото тепловой батареи. Отметим, что стоимость материальных расходов при изготовлении ФТБ

предложенной конструкции по сравнению ФЭБ обычной конструкции увеличивается на 15-17 %. Однако, увеличение эффективности преобразования электрической энергии составляет более 20-25 %. Кроме того появляется возможность получения горячей воды для создания определенного комфорта при использовании в сельских домохозяйствах. Про изводительность горячей воды с температурой 32 °С в данном случае составляла 40 литр/час.



**Рис.3.12.** Зависимость напряжения холостого хода ФЭБ от времени

Отметим, что изменение температуры горячей воды регулированием производительности представляет трудность связанная с большой емкостью коллектора, что требует большой промежуток времени.



**Рис.3.13.** Зависимость напряжения холостого хода ФТБ с усовершенствованным коллектором от времени.

Сравнивая результаты Рис.3.12. и Рис.3.13. отметим, что в случае рис.3.13. ФТБ с усовершенствованным коллектором эффективность коллектора больше, что дала возможность получения горячей воды с температурой 38 °C примерно за равный промежуток времени. К тому же температура окружающей среды в данном случае всего 25 °C, чем в первом случае на 8 °C ниже. При использовании комбинированной фото тепловой батареи для выработки тепла и электроэнергии можно значительно увеличить общий КПД гелиоустановки. В данном случае общую эффективность комбинированной системы можно вычислять следующим уравнением;

$$\eta = \eta_{эл} + \eta_k - \eta_{эл} \eta_k \quad (1)$$

где  $\eta_{эл}$  - КПД установки по электроэнергии;  $\eta_k$  – КПД теплового коллектора согласно цикла Карно. Запишем формулу для КПД обратимого цикла Карно:

$$\eta_K = \frac{T_{\Gamma} - T_0}{T_{\Gamma}} = 1 - \frac{T_0}{T_{\Gamma}} \quad (2)$$

где  $T_{\Gamma}$  – температура тыльной поверхности фотоэлектрической батареи;  
 $T_0$  – температура окружающей среды;

Согласно по результатам эксперимента температура горячей поверхности солнечного элемента раскалялись до  $T_{\Gamma}=75^{\circ}\text{C}$ , а температура окружающей среды доходила до  $T_0=33^{\circ}\text{C}$ . Тогда КПД обратимого цикла Карно составляет:

$$\eta_K = 1 - \frac{306}{348} = 1 - 0,879 = 0,121$$

КПД фотоэлектрической части комбинированной системы (СЭ на основе монокристаллического кремния  $\eta_{\text{эл}} \sim 0,18$ ) и тепла 50% эффективность установки составляет:

$$\eta = 0,18 + 0,121 - 0,18 \times 0,121 = 0,279$$

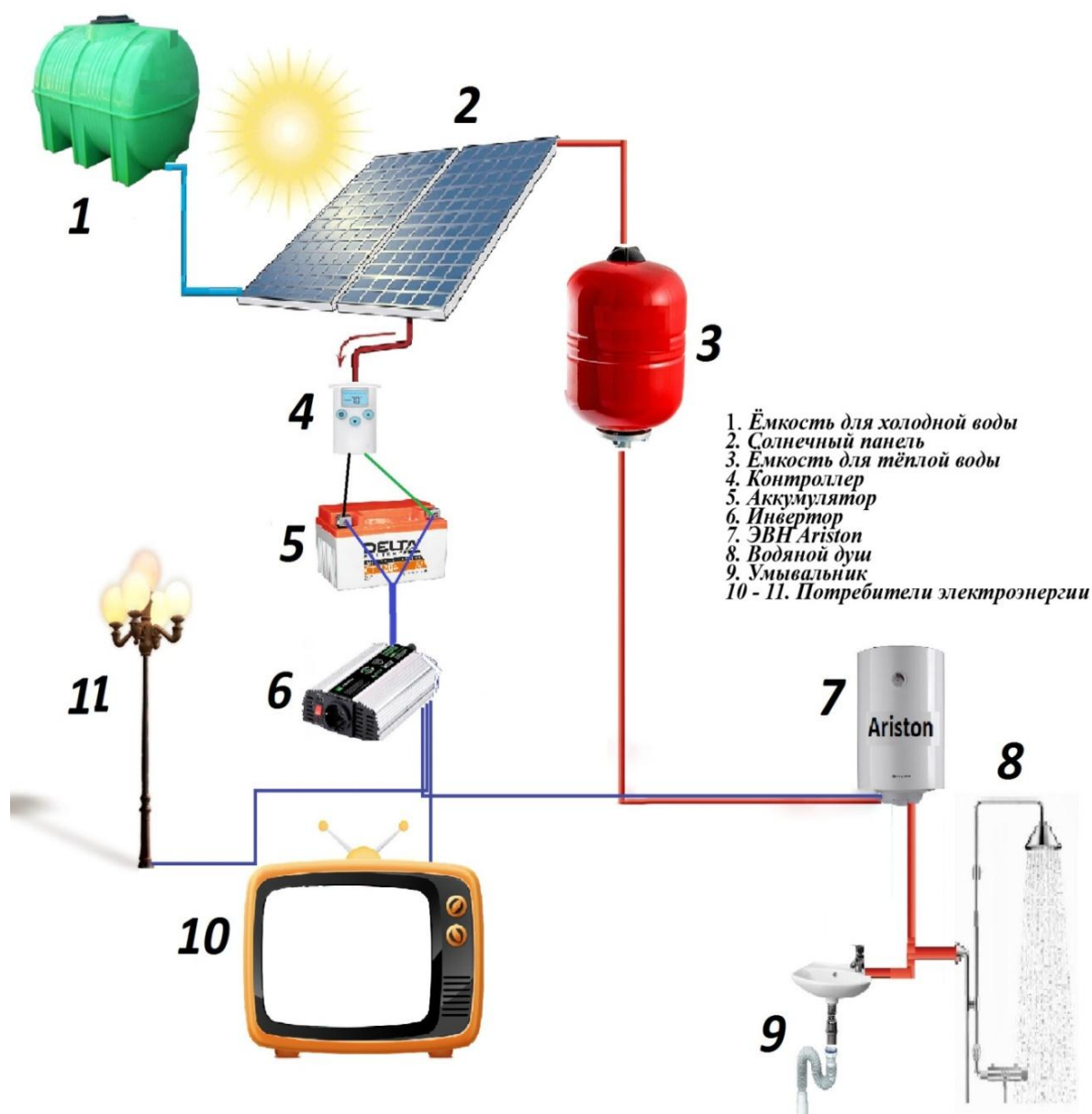
В результате проведенных экспериментов было установлено, что за счет тепловой эффективности коллекторного абсорбера, эффективность комбинированных ФТПБ (имеется в виду электроэнергия) увеличилась с 18 % до 28 %.

### **3.5. Комбинированная система ФТБ – ЭВН для обеспечения горячей водой и электроэнергией сельских домохозяйств**

Одним из основных проблем сельских регионов является обеспечения горячей водой сельских домохозяйств для создания комфорта домохозяйств при стирки, мытья посуды и использования душа для купания. При отсутствии или дефиците топлива угля, газа, дрова возникает необходимость использование электро водонагревательных приборов

(ЭВН). Однако при отсутствии или дефиците электрической энергии в сельских регионах республики, альтернативой является использование фотоэлектрических установок. В самое необходимое время года в летний период, как было выше показано, эффективность ФЭУ существенно снижается из-за влияния температуры. В связи с этим возникает необходимость исследования возможности использования фото тепловых батарей для решения данной проблемы. Количество горячей воды необходимая для семьи из 5-6 человек сельской местности в среднем в сутки составляет 150-200 литров (стирка 30-40 л, мытья посуды 30-40 л, душ 80- 120 л.). Непосредственное прямое использование ФТП для выполнения данной проблемы зависит погоды. При ежедневном ясном Солнце такая задача решается с использованием аккумулирующих емкостей, дающих возможность сохранения воды в течении 5-7 часов. Однако надежность такой системы для обеспечения семьи электроэнергией и теплой водой круглый период года невозможно. Поэтому для обеспечения надежности возникает необходимость комбинирования ФТБ с электро водонагревательным устройством, например, широко используемым «Аристом». В таком варианте использования системы ФТБ –ЭВН горячая вода с температурой 40-45°C от ФТБ накапливается в аккумулирующей емкости и затем при необходимости подается на «Аристон» (см. **Рис.3.14.** ).





При исследовании комбинированной системы ФТБ–ЭВН использованы устройства, блоки и приборы со следующими параметрами. Используются 2 ФТБ суммарной мощностью 340 Вт, аккумуляторная батарея емкостью 300 А час, инвертор мощностью 2000 Вт, водонагреватель «Аристон» мощностью нагревателя 1200 Вт.

При питании от электрической сети «Аристон» обеспечивает, нагрев воды от 18 °С (температуры холодной воды) до 90 °С в течении 45 минут. При этом расход электроэнергии составляет ~ 900 Вт. Затем электрическая мощность «Аристон» существенно уменьшается и зависит от расхода воды. Температура воды, используемая для бытовых целей, составляет 45-50 °С. В случае использования комбинированной системы ФТБ – ЭВН

«Аристон», когда используется электрическая энергия, вырабатываемая от ФТБ, происходит существенная экономия электроэнергии. В этом случае в качестве исходной воды используется теплая вода с температурой 40 °С и более, производимой ФТБ.

Кроме того можно ограничить температуру горячей воды менее чем до 90 °С, например, до 70 °С и ниже для экономии энергии, производимой в ФТБ. Таким образом, расход электрической энергии в случае использования комбинированной системы ФТБ-ЭВН уменьшится более, чем в 2 раза. Это дает возможность использования лишней энергии для системы освещения бытовых приборов. В зимние месяцы ноябрь- февраль необходимо увеличить количество фото тепловых батарей в два раза или комбинировать ФТБ с электрической низковольтной сетью. В этом случае фото тепловые батареи следует использовать, как обычных фотоэлектрических батарей.

### **3.6. Выводы**

1. Приведены методика измерения параметров и особенности испытания фото тепловых батарей.
2. Исследованы влияние климатических условий на эффективность использования фото тепловых установок. Проанализированы влияния на потери энергии ФТБ ориентирования, температуры окружающей среды, загрязнения поверхности. Показано, что при применении разработанных методов можно увеличить эффективность ФТБ 1,7-2,0 раза.
3. Разработана конструкция и технология изготовления фото тепловых батарей с полным тепловым контактом и исследованы параметры в натуральных условиях. Установлено, что за счет тепловой эффективности коллекторного абсорбера, эффективность

комбинированных ФТП батарей (имеется в виду электроэнергия) увеличилась с 18 % до 28 %.

4. Рассмотрена возможность использования комбинированной системы фото тепловая батарея – электро водонагревательное устройство «Аристон» для создания семейного комфорта по обеспечению электроэнергией и горячей водой сельского домохозяйства в течение года.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЯ**

- 1) Проанализированы современное состояние использования фотоэлектрических станций, зависимость параметров от различных факторов и климатических условий, современная технология изготовления солнечных элементов на основе кристаллического кремния и фотоэлектрических батарей
- 2) Рассмотрены вопросы эффективного использования фотоэлектрических систем в условиях климата республики Узбекистан и возможные методы повышения эффективности преобразования и использования в условиях жаркого климата республики.
- 3) Приводится конструкция коллекторной части установки ФТП в форме «меандра» на основе медной трубы. Установка имеет лучшие параметрами, по сравнению с установкой ФТП с прямым контактом теплоносителя с тыльной стороной ФЭБ. Дневная производительность по горячей воде на 20 % больше (при температуре окружающей среды 40 °С и более) по сравнению с установкой с прямым контактом теплоносителя за счет снижения потери тепла.
- 4) Рассмотрены результаты исследования параметров ФТП установки с конструкцией коллекторной части типа «решетка» из нержавеющей стали, в условиях солнечного освещения и показано, что производительность по горячей воде с температурой 50 °С (при температуре окружающей среды 40 °С) составляет 20-22 литр час. Сравнение электрических параметров ФТП батареи с ФЭБ показывает, что мощность обычной ФЭБ уменьшается на 30-32 %, а у ФТП батареи на 15-16 % при температурах выхода воды с коллектора 40 °С.
- 5) Приведены методика измерения параметров и особенности испытания фото тепловых батарей.

6) Исследованы влияние климатических условий на эффективность использования фото тепловых установок. Проанализированы влияния на потери энергии ФТБ ориентирования, температуры окружающей среды, загрязнения поверхности. Показано, что при применении разработанных методов можно увеличить эффективность ФТБ 1,7- 2,0 раза.

7) Разработана конструкция и технология изготовления фото тепловых батарей с полным тепловым контактом и исследованы параметры в натурных условиях. Установлено, что за счет тепловой эффективности коллекторного абсорбера, эффективность комбинированных ФТП батарей (имеется в виду электроэнергия) увеличилась с 18 % до 28 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Твайделл. Дж., Уэйр А., «Возобновляемые источники энергии». М., Энергоатомиздат, 1990.
2. Лидоренко Н.С., Рябиков С.В., Стребков Д.С. «Преобразование солнечной энергии». М., Наука, 1985.
3. Грилихес В.А., Орлов П.П., Попов Л.В. «Солнечная энергия и космические полеты». М., Наука, 1984.
4. Reinahrts K.K. Photovoltaic power generator in space – In: Proc. 2 E.G. Photovolt. SolarEnergyConf., Berlin, 1979; N.Y.: IEEE, 1979, p. 456-468
5. Андреев В.М., Румянцев В.Д., «Солнечные гетеро фотоэлементы и энергоустановки на их основе». Электротехника, 1986, №2, ст. 11.
6. Колтун М.М. «Солнечные элементы». М., Наука, 1987.
7. Лидоренко Н.С., Колтун М.М. «Солнечное электричество». Техника и наука, 1980 №8, стр. 12-14.
8. Васильев А.М., Ландсман А.П. «Полупроводниковые фотопреобразователи». М., Сов., Радио, 1971.
9. Колтун М.М. «Селективные оптические поверхности преобразователей солнечной энергии». М., Наука, 1979.
10. Tobin S.P., Keavney C.I., Geoffroy L.M. et.al., 20th IEEE Photovoltaic Conf. Las Vegas, 1988, p.545-548
11. M. A. Green. Solar Cells – operating principles and technology and system applications, University of New South Wales, Kensington, (1992)
12. Gaziev U., Djanklich M., Diskin V., Muminov R., Settarova Z., Tursunov M., Effective antireflection covers for photoconvertors on the base of polycrystalline silicon, Applied Solar Energy, New-York, 2003, № 1, C.3-12
13. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., 1963

14. Reinahrts K.K. Photovoltaic power generator in space – In: Proc. 2 E.G. Photovolt. Solar Energy Conf., Berlin, 1979; N.Y.: IEEE, 1979, p. 456-468.
15. Лидоренко Н.С., Рябиков С.В., Стребков Д.С. «Преобразование солнечной энергии». М., Наука, 1985.
16. Lenders F. et al. (1999) Technologieverkenning hybride PV/T concepten, Ecofys/Novem report 149.600-708.1, Utrecht
17. PTV panels: Fully renewable and competitive, M. Bakker et al., ISES Solar world congress 14-19.06.03, Goteborg, Zweden
18. PVT panels and collectors: pathways to distributed solar cogeneration, W. G. J. van Helden et al., European solar thermal energy conference (ESTEC) 26-27.06.03, Freiburg
19. ЗиС. Физика полупроводниковых приборов. Мир, 1984
20. Yang J., Banerjee A., Lord K., Guha S. Correlation of Component Cells with High Efficiency Amorphous Silicon Alloy Triple-Junction Solar Cells and Modules. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
21. Guha S. , Yang J., Banerjee A. , Glatfelter T. Amorphous Silicon Alloy Solar Cells for Space Application. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
22. В. М. Фомкин и др., Основы энергосбережения в вопросах теплообмена, «Издательство Машиностроения-1», Москва-2005
23. Duffie, J.A., & Beckman, W.A. (1991). Solar engineering of thermal processes; second edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.
24. Турсунов М.Н., Муминов Р.А., Газиев У.Х., Сеттарова З.С., Тукфатуллин О.Ф., «Научные и технологические аспекты разработки фотоэлектрической установки для работы в условиях жаркого климата», УДК 621.382
25. Р.А. Муминов, М.Н. Турсунов, О.Ф. Тукфатуллин, «Влияние температуры на вольтамперные характеристики фотоэлектрических батарей на базе монокристаллического кремния»

26. Solar Energy Materials & Solar Cells 92 (2008) 1611–1616, Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell, Priyanka Singh, S.N. Singh, M. Lal, M. Husain
27. Green, M.A., Emery, K., Blakers, A.W., 1982. Silicon solar cells with reduced temperature sensitivity. Electron. Lett. 18, 97.
28. Osterwald, C.R., Glatfelter, T., Burdick, J., 1987. Comparison of the temperature coefficients of the basic I–V parameters for various types of solar cells. Proceedings of 19th IEEE PVSC, 188
29. Friedman, D.J., 1996. Modelling of tandem cell temperature coefficients, proceedings of 25th IEEE PVSC, 89.
30. Nann, S., Emery, K., 1992. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 27, 189.
31. Solar Energy 78 (2005) 243–250, Photovoltaic solar cells performance at elevated temperatures, David Meneses-Rodriguez , Paul P. Horley Jesus Gonzalez-Hernandez, Yuri V. Vorobiev,\*, Peter N. Gorley
32. Solar Energy 78 (2005) 211–222, Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector, Joe S. Coventry
33. Турсунов М.Н., Муминов Р.А., Газиев У.Х., Сеттарова З.С., Тукфатуллин О.Ф., Научные и технологические аспекты разработки фотоэлектрической установки для работы в условиях жаркого климата, Гелиотехника, 2006, №3, с.13-17
34. А.Г.Комилов, Р.А Муминов, Турсунов М.Н., Оценка эффективности системы солнечного элемента и коллектора в условиях жаркого климата, Гелиотехника, 2008, № 2, с.32-35.
35. Мирзабаев М., Лутпуллаев С.Л., Авезов Р.Р., Турсунов М.Н., Мирзабаев А.М., Кононоров В.П., Тукфатуллин О.Ф., Фототеплопреобразователь, патент №FAP 00496 17.03.2009 й
36. В.М Андреев, В.А. Грилихес, В.Д Румянцев Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. –Л: Наука, 1989 г. стр. 310
37. М.М. Колтун Солнечные элементы М: Наука, 1987. стр.120



38. М.Н. Турсунов, Р.А. Муминов, О.Ф. Тукфатуллин, Юлдошев И.А и Абдуллаев Э.Т. Фототермоэлектрические батареи на основе кремниевых солнечных элементов. Гелиотехника, 2011, № 1, стр.72-75
39. Solar Energy Vol. 72, No. 3, pp. 217–234, 2002, Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, Y. Tripanagnostopoulos , TH. Nousia, M. Souliotis and P. Yianoulis
40. Rudiono, Shuichi Okazaki, Manabu Takeuchi. Effects of NO<sub>2</sub> on Photovoltaic. Performance of Phtalocyanine Thin Film Solar Cells. – Thin Solid Films, 334(1998), p.187-191.
41. Photovoltaic/thermal collectors in large solar thermal systems, M.J. Elswijk, M.J.M. Jong, K.J. Strootman, J.N.C. Braakman, E.T.N. de Lange, W.F. Smit, 19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition”, 7-11 June 2004, Paris, France
42. Guha S. , Yang J., Banerjee A. , Glatfelter T. Amorphous Silicon Alloy Solar Cells for Space Application. – Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.
43. Касымахунова А.М. Исследование возможности прямого преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью фототермобатарей, Автореф.дис.канд.техн.наук – Ашхабад: НПО «Солнце», 1982, с.19.
44. Турсунов М.Н., Муминов Р.А., Газиев У.Х., Сеттарова З.С., Тукфатуллин О.Ф., Научные и технологические аспекты разработки фотоэлектрической установки для работы в условиях жаркого климата, Гелиотехника, 2006, №3, с.13-18.
45. А. В. Смирнов. «Повышение эффективности концентраторов солнечных энергетических установок с высоковольтными фотопреобразователями» Автореф. Дисс. канд. тех. наук – Всерос. НИИ электрификации сел.хоз-ва. - Москва, 2010. – С. 26

46. Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, О.Е. Аркатова. *Повышение энергетической эффективности Доклады ТУСУРа, № 2 (22), часть 2, декабрь 2010.*
47. Т.Т.Рискиев, М.Н.Турсунов, Э.Т.Абдуллаев, «Фотоэлектрические станции, интегрированные в действующую сеть электроснабжения», «Энерго- и ресурсосбережение», 2015 г., №1-2, с. 187-193 .
48. Рискиев П.Т., Муминов Р.А., Турсунов М.Н., Собиров Х., Абдуллаев Э.Т., *Автономная мобильная фотоэлектрическая система обеспечения энергией объектов, удаленных от источников энергии, стр., 106-109,* “Нанотехнология ва қайта тикланадиган энергия манбалари: муаммолар ва ечимлар”, Республика илмий-амалий анжуман материаллари, 27-28 апрель 2012 йил, Қарши – 2012.
49. Патент на промышленный образец №SAP 01413 от 22.04.2015. Фотоэлектрическая установка с принудительным охлаждением. Турсунов М.Н, Собиров Х, Юлдошев И.А, Комолов И.М. Расмий ахборотнома. 29.02.2016.№ 2.
50. И.А.Юлдошев. Повышение эффективности фотоэлектрической батареи принудительным охлаждением. Проблемы энерго-ресурсосбережения. Ташкент, 2015.№3. С. 122-127.
51. М.Н. Турсунов., В.Г. Дыскин., Б.М. Турдиев, И.А. Юлдошев. Влияние конвективного теплообмена на температуру солнечной фотоэлектрической батареи // Гелиотехника. – Ташкент, 2014. – №4. – С. 34-37.
52. Sandnes B., Rekstad J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate: experimental study and analytic model // Solar Energy. 2002. № 72 (1). P. 63-73.
53. М.Н Турсунов, Сабиров Х, И. А. Юлдошев, А., Комолов И.М. Повышение эффективности фототепловых батарей применением полимерных материалов для отвода тепла// Республика илмий амалий анжумани, Карши 2016. 15 апрель. 259-261бет.

54. И.А. Юлдошев, Автореферат докторской диссертации, Ташкент 2016 г., с. 50-51. /10/. В.Г., Турсунов М.Н. Абдуллаев Э.Т., «Проблемы энерго- и ресурсосбережения», 2016, № 1-2, стр. 4 -6.
55. Турсунов М.Н., Дыскин В.Г., Сабиров Х., Абдуллаев Э.Т., Комолов И. Методика измерения степени загрязнения стекла. Сборник трудов конференции «Возобновляемые источники энергии: технологии и установки», Ташкент, 2016, С 132-135.
56. В. И. Егоров, А. В. Нащекин, П. А. Образцов, А. И. Сидоров, П. Н. Брунков Оптический журнал. 2013, т. 80, № 3, С. 61-67
57. M. Mani, R. Pillai//Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010., v. 14, P 3124 -3131.
58. M. Piliougine, C. Canete, R. Moreno, J. Carretero, J. Hirose, S. Ogawa, M. Sidrach-de-Cardona //Applied Energy 2013, 112, P 626–634
59. M. N. Tursunov., V.G. Dyskin., I.A Yuldashev., Kh. Sobirov., ParkJeongHwoan. A//AppliedSolarEnergy. 2015. v.51. pp. 163-164.
60. Рискиев Т.Т., Турсунов М. Н. и другие Фотоэлектрическая установка электропитания сейсмологических объектов, Гелиотехника, 2010, № 3, с.
61. Sandnes B., Rekstad J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate: experimental study and analytic model // Solar Energy. 2002. № 72 (1). P. 63-73
62. <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/Length/ParticleSi>

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА

1. М. Н. Турсунов, И. М. Комолов, **Т. З. Ахтамов**, С. А. Даминов. Энергообеспечивающая установка для сельского домохозяйства // Физиканинг долзарб муаммолари республика илмий амалий конференцияси. Ташкент, 2017. 14-окт. С. 173-175.
2. М. Н. Турсунов, Х. Сабиров, **Т. З. Ахтамов**, С. А. Даминов. Фототепловая установка для энергообеспечения сельского домохозяйства // Энерго эффективныеи энерго сберегающий технологии – основа развития энергетики узбекистана республика илмий амалий конференцияси. Ташкент, 2017. 22 - 23 дек.
3. Турсунов М. Н., Турдиев Б. М., Абдуллаев Э. Т., **Ахтамов Т. З.**, Даминов С. А.. Особенности практического использования фотоэлектрических систем в условиях климата Узбекистана // Перспективы развития возобновляемых источников энергии в узбекистане международную конференцию. Ташкент, 2018. 28 – март.
4. Турсунов М. Н., Турдиев Б. М., Абдуллаев Э. Т., Даминов С. А., **Ахтамов Т. З.** Особенности практического использования фотоэлектрических систем в условиях климата Узбекистана // Физика фанининг ривожиди истеъдодли ёшларнинг ўрни РИАК-XI-2018 Республика илмий анжумани, Ташкент, 2018. 11 –12 май. С. 125-126.