

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Институт промышленной автоматизации и цифровизации имени А.Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

Каримов Даурен Даулетович

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Совершенствование солнечной установки с охлаждением

5B071800 - «Электроэнергетика»

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

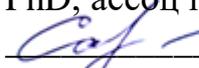
Институт промышленной автоматизации и цифровизации имени А.Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

PhD, ассоц профессор

 Е.А.Сарсенбаев

«01» июня 2020 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

на тему: «Совершенствование солнечной установки с охлаждением»

5B071800 - «Электроэнергетика»

Выполнил:



Каримов Д.Д.

Научный руководитель

Лектор

Шакенов К.Б.



«01» июня 2020 г.

Алматы 2020

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Институт промышленной автоматизации и цифровизации имени А.Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

УТВЕРЖАЮ

Заведующий кафедрой

PhD, ассоц профессор

 Е.А.Сарсенбаев

«27» января 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Студенту Каримову Д.Д.

Тема: *Совершенствование солнечной установки с охлаждением*

Утверждено приказом Ректора Университета № 762-п от «27» января 2020 г.

Срок сдачи законченной работы: «2» июня 2020 г.

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов:

- а) ФЭ технология;
- б) Проблемы охлаждения фотоэлектрических модулей;
- в) Сравнительное исследование системы охлаждения ФЭ;
- г) Анализ и вывод результатов исследования.

Перечень графического материала:

представлены 10 слайдов презентации работы.

Рекомендуемая основная литература:

- 1 Dubey, Swapnil, JatinNarotamSarvaiya, and BharathSeshadri. "Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review." *Energy Procedia* 33 (2013): 311-321.
- 2 Chandel, S. S., and Tanya Agarwal. "Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73 (2017): 1342-1351.
- 3 Grubišić-Čabo, Filip, Sandro Nižetić, and Tina Giuseppe Marco. "Photovoltaic panels: a review of the cooling techniques."

ГРАФИК

Подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Замечания
ФЭ технология	13.02.2020	нет
Проблемы охлаждения фотоэлектрических модулей	15.03.2020	нет
Сравнительное исследование системы охлаждения ФЭ	28.04.2020	нет
Экспериментальные процедуры	5.05.2020	нет

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу

Наименования разделов	Консультанты, Ф.И.О. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
ФЭ технология	Шакенов К.Б., Лектор	15.02.2020	
Проблемы охлаждения фотоэлектрических модулей	Шакенов К.Б., Лектор	18.03.2020	
Сравнительное исследование системы охлаждения ФЭ	Шакенов К.Б., Лектор	02.05.2020	
Анализ и вывод результатов исследования	Шакенов К.Б., Лектор	8.05.2020	
Нормоконтроль	Бердибеков А.О., сеньор - лектор	1.06.2020	

Научный руководитель



Шакенов К.Б.

Задание принял к исполнению обучающийся



Каримов Д.Д.

Дата «03» февраля 2020 г.

АНДАТПА

Бұл жоба тәжірибе ұсынады, онда үш фотоэлектрлік модульдерге арналған салқындату жүйесі модельденді және сыналды. Энергияны тұтынбайтын екі пассивті салқындату жүйесі. Біреуі модульдің артқы қабырғасының ортасындағы үлкен алюминий жылытқыштан тұрады, ал екіншісі мыс жылу құбырлары мен бірдей алюминий жылу қабылдағышынан тұрады. Үшінші жүйе судың салқындатуынан тұрды, оның ішінде резервуардан су перфорацияланған құбыр арқылы жұмыс беті бойымен таралған модульдің жұмыс беті бойымен біркелкі сорылды. Салқындату жүйесі сәтті болған жағдайда модульдің электр тиімділігі едәуір артып, өтелу мерзімі төмен болуы керек.

АННОТАЦИЯ

В этом проекте представлен эксперимент, в котором было смоделировано и протестировано три системы охлаждения для фотоэлектрических модулей. Две системы охлаждения пассивные, не потребляющие энергию. Одна просто состоит из большого алюминиевого теплоотвода по центру задней стенки модуля, а другой, состоящий из комбинации медных тепловых труб и такого же алюминиевого теплоотвода. Третья система состояла из водяного охлаждения, при котором вода из резервуара равномерно перекачивалась по рабочей поверхности модуля, который распространился по рабочей поверхности через перфорированную трубу. При успешной системе охлаждения электрическая эффективность модуля должна значительно повыситься и иметь низкий срок окупаемости.

ANNOTATION

This project presents an experiment in which three cooling systems for photovoltaic modules have been simulated and tested. The two cooling systems are passive and do not consume energy. One simply consists of a large aluminium heat sink in the centre of the module's rear wall and the other consists of a combination of copper heat pipes and the same aluminium heat sink. The third system consisted of a water cooling system in which water from the tank was uniformly pumped over the module's working surface, which spread over the working surface through a perforated tube. With a successful cooling system, the electrical efficiency of the module should be significantly improved and have a low payback period.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	7
1	Общие сведения	8
1.1	ФЭ технология и соотношение между температурой и производительностью.	8
1.2	Проблемы охлаждения фотоэлектрических модулей.	10
2	Обзор проекта	13
2.1	Чего ожидать в следующих разделах	14
2.2	Предпосылка	15
3	Исследования и работы по охлаждению ФЭ	16
3.1	Параметры эффективности и параметры настройки тестирования	22
3.2	Сравнительное исследование системы охлаждения ФЭ	23
3.3	Экспериментальные процедуры. Испытательная установка	25
3.4	Информация DAQ и расположение термopара	26
3.5	Алюминиевая радиаторная раковина (пассивное охлаждение)	27
3.6	Труба нагрева из меди и алюминиевый радиатор комбинированного пассивного охлаждения	27
3.7	Охлаждение трубы со встроенным медным теплообменником	29
3.8	Активное водяное охлаждение с помощью погружного насоса	30
4	Презентация результатов и анализ	32
4.1	Обсуждение результатов	33
	Заключение	36
	Список использованной литературы	38

ВВЕДЕНИЕ

Использование фотоэлектрических модулей (ФЭ) для производства электроэнергии неуклонно растет по ряду причин: 1) в связи с технологическим совершенствованием, снижением стоимости материалов 2) Государственная поддержка варианта электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии 3) Снижение количества доступного ископаемого топлива 4) Растущее признание изменения климата как реальной и существующей опасности для всего живого на Земле. Все эти факторы привели к огромному увеличению инвестиций в возобновляемые источники энергии. ФЭ является лишь одним из многочисленных перспективных методов возобновляемых источников энергии. К сожалению, производительность технологии фотоэлементов чувствительна к рабочей температуре. Так как энергия вырабатывается через кремниевые элементы, которые являются полупроводниковым материалом, вырабатывающим электрическую энергию при инциденте с солнечным излучением. Как и у всех полупроводников при увеличении рабочей температуры, выходное напряжение резко снижается, несмотря на незначительное увеличение выходного тока, в результате чего в целом получается значительное снижение выработки электроэнергии и эффективности модулей. Глобальный потенциал фотоэлектрической энергетики, как первичного источника энергии, зависит от проектирования более эффективных фотоэлектрических систем.

1 Общие сведения

1.1 ФЭ технология и соотношение между температурой и производительностью

ФЭ напрямую преобразует солнечное излучение в электричество. Каждый элемент состоит из слоев полупроводникового материала, р и n-типа. При инциденте со светом, элемент воздействует электрическим полем между слоями, в результате чего получается выходное напряжение и ток. Ячейки либо поликристаллические, состоящие из кусков из многочисленных кремниевых кристаллов, либо монокристаллические, которые вырезаются из одного большого кристалла. Монокристаллические ячейки имеют большую эффективность преобразования и стоимость. Это представляет собой проблему, так как текущая технология ФЭ имеет относительно низкую эффективность преобразования, 6-20%. Между тем, остальные 80-94% падающего солнечного излучения преобразуются в тепло, что значительно повышает температуру фотоэлементов и снижает их эффективность [1]. Влияние рабочей температуры на производительность фотоэлектрических модулей хорошо документировано, где высокие температуры существенно влияют на выходную мощность. Как показано на рис. 1, повышение температуры приводит к небольшому увеличению тока, но значительному снижению выходного напряжения, что приводит к значительному снижению выходной мощности для данного количества солнечного излучения. Это было приравнено к снижению эффективности преобразования фотоэлектрических модулей примерно на 0,4-0,5% при каждом градусе повышения температуры [2]. Кроме того, полупроводниковый эффект сам по себе производит тепло, как и вся электроника, что также усугубляет эту проблему.

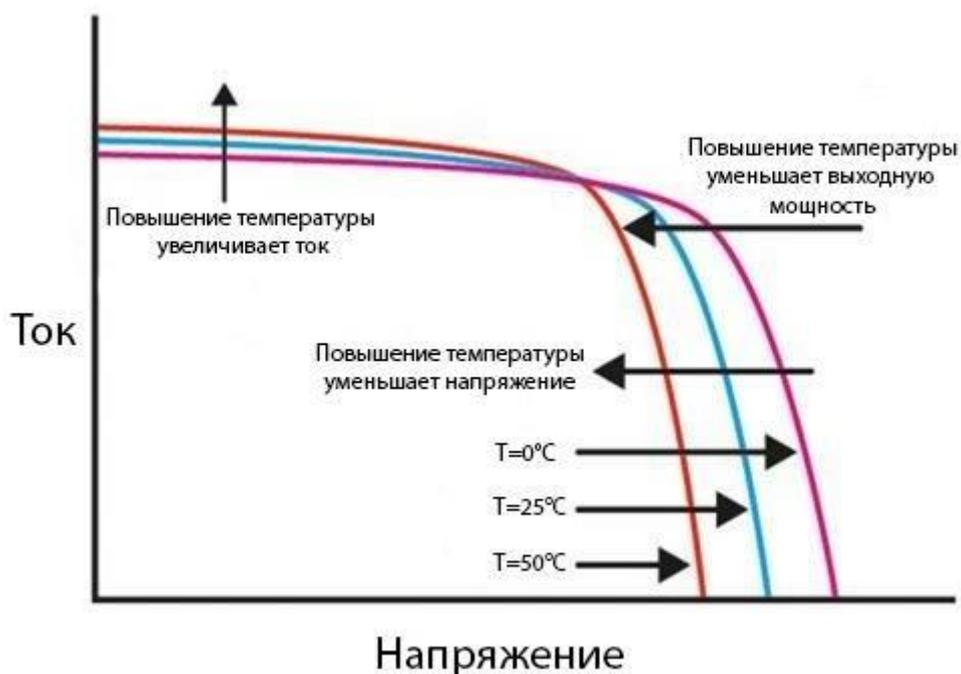


Рисунок 1. Влияние температуры на кривую напряжения и тока на выходе для фотоэлектрических характеристик [3].

Части Земли с наибольшим солнечным потенциалом, как правило, имеют жаркий климат, демонстрируя огромную возможность увеличить глобальные возможности производства солнечной энергии за счет дешевого и эффективного снижения температуры фотоэлектрических элементов.[1] Было проведено исследование температурно-зависимой эффективности фотоэлектрических элементов и ее влияния на производство электроэнергии во всем мире, обнаружив, что производительность фотоэлектрических элементов в первую очередь зависит от используемого фотоэлектрического материала и климатических условий, где разница между температурой фотоэлектрических элементов и окружающей средой в значительной степени зависит от скорости ветра, солнечной, а не атмосферной температуры, что показывает эффективность естественной конвекции от ветра. Во время осеннего семестра тестирование базового модуля проводилось снаружи, и наблюдалась температура ячейки, которая была на $10\text{-}20^{\circ}\text{C}$ горячее, чем окружающая среда. Кроме того, в особенно холодный осенний день, когда регистрируемая температура элементов была примерно на 25°C ниже указанной номинальной рабочей температуры панелей, наблюдаемая эффективность преобразования была на $6\text{-}12\%$ выше, чем та, которая была указана в технических характеристиках панелей. Далее, подтверждается

большое влияние рабочей температуры на эффективность фотоэлектрического преобразования.

Высокие рабочие температуры также значительно сокращают срок службы фотоэлектрических модулей. Это связано с повышенной термической усталостью, вызывающей чрезмерные напряжения в солнечных батареях [4]. Качество кремниевого фотоэлектрического материала является основным определяющим фактором эффективности преобразования и первоначальной стоимости солнечного модуля, где получается то, за что он платит. Кроме того, типичная гарантия на фотоэлектрические модули составляет 20 лет, где каждый год ожидается 1% деградации. Высокие температуры значительно увеличивают нагрузку на солнечные батареи. Было установлено что, если бы применялась та же постоянная скорость падающего солнечного излучения, "это заняло бы в четыре раза больше времени при 65°C, чтобы вызвать ту же самую деградацию, что и при 85°C" [5]. Это примерно сокращает срок службы модуля до 5 лет, с 4 % деградацией каждый год. Кроме того, раскрывается возможность использования экономичных фотоэлектрических систем охлаждения для увеличения мирового производства солнечной энергии.

1.2 Проблемы охлаждения фотоэлектрических модулей

В связи со значительным влиянием температуры на производительность фотоэлектрических модулей, много исследований было посвящено возможным экономически эффективным способам охлаждения фотоэлектрических модулей. Попытки охлаждения фотоэлектрических модулей были исследованы еще в 1980-х годах с использованием различных методов и результатов. В последние годы, по мере снижения стоимости кремниевых солнечных батарей и роста популярности возобновляемых источников энергии, возросла возможность усовершенствования методов охлаждения фотоэлектрических батарей. Проблемы проектирования экономически эффективной системы охлаждения фотоэлектрических батарей можно разделить на три различных вопроса. Первый заключается в том, чтобы понять и рассмотреть многочисленные факторы, которые влияют на температуры ячеек, и как они будут влиять на потенциальные системы охлаждения. Вторая проблема связана с большой площадью поверхности,

которая должна охлаждаться с учетом относительно низкой выработки электроэнергии на каждый модуль. Кроме того, проблема охлаждения фотоэлектрических элементов заключается в обеспечении равномерного распределения температуры по рабочей поверхности, так как "горячие точки" увеличивают деградацию модуля. Эти проблемы должны быть решены для того, чтобы система охлаждения была эффективной в оптимизации охлаждения.

Температура фотоэлементов зависит от полученной инсоляции, скорости и направления ветра по поверхности модуля, а также от температуры окружающей среды [6]. Несмотря на то, что эти факторы в значительной степени находятся вне контроля человека, важно их учитывать при проектировании системы охлаждения фотоэлектрических ячеек. Однако ориентация модуля, а также расположение и компоненты системы охлаждения находятся под контролем человека. В результате, знание специфики того, как эти факторы окружающей среды по-разному влияют на температуру ячейки, жизненно важно для уменьшения удержания тепла. Трудность в охлаждении ФЭ модулей в том, что система охлаждения не должна значительно увеличить общую начальную цену, и эффективно увеличить эффективность, чтобы быть стоящей. Если система спроектирована без учета влияния окружающей среды, стоимость обслуживания системы может перевесить преимущества улучшенного электрического выхода.

Кроме того, одной из самых больших проблем с охлаждением фотоэлектрических элементов является большая площадь поверхности по отношению к производимой мощности. Один фотоэлектрический модуль имеет площадь около 2 м² и номинальную выходную мощность около 335 Вт. В результате, примерно 6 м² должны охлаждаться на каждый киловатт, произведенный в лучшем сценарии. Следовательно, любой крупномасштабный солнечный проект потребовал бы столько площади для охлаждения, что любая эффективная система охлаждения должна быть крайне недорогой, чтобы не заметно поднять стоимость системы.

Кроме того, равномерное распределение температуры важно для производительности фотоэлектрической системы, поэтому любая система охлаждения должна стремиться к равномерному рассеиванию тепла по рабочей поверхности. Горячие точки в фотоэлектрической системе оказывают огромное влияние на производительность и срок службы системы.

Неравномерность температуры по всему фотоэлектрическому модулю приводит к увеличению серийного сопротивления, снижению эффективности преобразования и коэффициента заполнения [4]. Кроме того, большинство традиционных механизмов охлаждения приводят к изменению температуры по всей рабочей поверхности.

Таким образом, экономически эффективное охлаждение фотоэлектрических модулей представляет ряд сложных проблем, которые привели к текущим исследованиям в этой области, а также дальнейшие возможности для улучшения.

2 Обзор проекта

Целью данного проекта было исследование потенциала экономически эффективных ФЭ систем охлаждения, путем сравнения трех прототипов, которые были испытаны. Два прототипа охлаждаются пассивным способом, не потребляя энергии. В одном использовался большой алюминиевый радиатор, расположенный сзади модуля. Затем в дополнение к алюминиевому радиатору были добавлены медные тепловые трубы для дальнейшего изучения возможности пассивного охлаждения. Наконец, для сравнения, был создан прототип системы охлаждения дождевой водой, состоящей из погружного насоса, небольшого резервуара и перфорированной трубки, закрепленной в верхней части модуля для равномерного распределения воды по рабочей поверхности.

Важно отметить, что эти прототипы в данном эксперименте были испытаны только на однофазном модуле, но могли быть легко реализованы и на двухфазном модуле. Двухфазный фотоэлектрический модуль имеет ячейки, открытые с обеих сторон, при этом он удваивает рабочую поверхность фотоэлектрического модуля, не занимая больше объема, и часто используется в концентрировании фотоэлектрических систем с помощью рефлекторов и линз. В связи с увеличением выработки энергии на единицу площади, двухфазные фотоэлектрические модули справляются с повышенным количеством тепла при работе по сравнению с однофазными. Однако, в связи с ограниченностью ресурсов и времени в этом эксперименте, было решено сосредоточиться на однофазном охлаждении.

Также было протестировано и произведено сравнение этих трех систем, потому что каждая из них имеет большой потенциал для экономичного охлаждения ФЭ модулей благодаря их относительно низкой стоимости, высокой скорости теплопередачи и низкому техническому обслуживанию. Завершая проект в надежде, что будущие проектировщики смогут распознать наиболее перспективный метод охлаждения, чтобы его можно было доработать и внедрить.

2.1 Чего ожидать в следующих разделах

Остальная часть настоящего доклада содержит справочную информацию, экспериментальные процедуры, результаты и анализ, обсуждение результатов и заключение с рекомендациями.

В справочном разделе приведена разбивка предыдущих методов и исследований по охлаждению фотоэлектрической энергией. Документально подтверждена эффективность каждого из них, который был использован для выбора перспективных методов охлаждения, исследованных в данном исследовании. Кроме того, приводятся указания, где можно внести дальнейшие улучшения для доработки различных методов, и как правильно тестировать фотоэлектрические модули.

Раздел "Экспериментальная процедура" включает в себя материалы и методы, использованные для испытаний прототипов. Обзор средств сбора и анализа данных. Кроме того, в этот раздел включены изображения испытательной установки, а также расположение термопара для каждого испытываемого прототипа.

Раздел "Результаты и анализ" состоит из таблиц, обобщающих исходные данные для всех испытаний модулей и эффективность охлаждения каждой конструкции. Кроме того, в этом разделе приводится углубленный анализ производительности и стоимости каждого из них, а также обобщаются результаты для каждого проекта. В комплекте с окупаемостью год, ожидаемая продолжительность жизни и увеличение выработки электроэнергии на единицу площади.

За разделом "результаты и анализ" последует раздел "Обсуждение результатов". В разделе "Обсуждение результатов" подробно объясняется, что именно было изучено, приводится сравнение конструкций и релевантность полученных результатов. Все три были сопоставлены друг с другом, а также с результатами некоторых предыдущих исследований систем охлаждения фотоэлектрических систем.

Наконец, раздел "Заключение" служит для того, чтобы еще раз сформулировать проблему и обобщить полученные результаты. Кроме того, этот раздел содержит рекомендации для будущей работы и завершает исследование. За заключительным разделом следуют ссылки и приложения.

2.2 Предпосылка

В этом разделе доклада будет предпринята попытка дать более подробное представление об основах для данной работы. История вопроса состоит из четырех подразделов: Предыдущие исследования и работы по охлаждению фотоэлектрических панелей, эффективные параметры и параметры настройки тестирования, а также основа для текущей работы: Сравнительное исследование системы охлаждения фотоэлектрических элементов. Соответственно, в каждом разделе представлена более подробная информация об охлаждении фотоэлектрических панелей в прошлом. Попытки, установленные методы и факторы тестирования модулей, цель и спецификации для текущего проекта, а также метрики функционального успеха для прототипа тепловых труб и систем водяного охлаждения.

3 Исследования и работы по охлаждению ФЭ

В последние годы многие пытались использовать различные методы для эффективного охлаждения фотоэлектрических модулей, в результате чего был получен ряд различных результатов. Эффективные системы должны быть спроектированы таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение температуры по всей рабочей поверхности, поддерживая температуру ячейки на минимальном ее уровне. Предыдущие исследования по охлаждению фотоэлектрических модулей можно разделить на две категории. Активные методы, которые потребляют энергию, и пассивные методы, которые не потребляют. Активные методы используют насосы и вентиляторы для реализации принудительной конвекции по всему модулю. Пассивные состоят из методов, не потребляющих энергии, таких как теплоотводы, фотоэлектрические тепловые коллекторы (PV/T). В целом, все эти различные методы охлаждения потерпели неудачу, но обещали быть усовершенствованными для широкого использования. В этом разделе должны быть представлены и проанализированы предыдущие работы по охлаждению ФЭ, относящиеся к активному охлаждению с помощью насоса и вентилятора, пассивному водяному охлаждению, PV/T системам, охлаждению с помощью материала для изменения фазы (PCM), а также пассивному охлаждению с помощью тепловой трубы/поглотителя.

Активные методы охлаждения потребляют энергию для применения принудительной конвекции над рабочей поверхностью фотоэлектрической системы. Воздушное или водяное охлаждение, соответственно, с использованием вентиляторов или насосов для управления потоком. Мазон-Хернандес в работе [7] исследовал принудительное конвекционное воздушное охлаждение с использованием вентиляторов для охлаждения задней стенки монтируемых на крыше фотоэлектрических модулей, тестовая установка может быть представлена на рис.2. Общее увеличение КПД составило 2%, а максимальное снижение температуры в камере 15°C, где расстояние между модулем и крышей, массовый расход воздуха и температура окружающей среды оказали значительное влияние на производительность системы. Что касается водяного охлаждения, поток может подаваться как на переднюю, так и на заднюю сторону модуля. Авторы в [8] сообщили о десяти прошлых исследованиях по охлаждению фотоэлектрической водой и пришли к выводу, что предпочтительным является фронтальное охлаждение, где примерно 20% увеличение эффективности является стандартным. Движущие факторы охлаждающего

эффекта систем водяного охлаждения — это глубина потока, массовый расход и температура воды. Кроме того, мощность, потребляемая насосом, должна быть сведена к минимуму для практических систем. В целом, в этих исследованиях было установлено, что вода является предпочтительной рабочей жидкостью из-за ее высокой теплоемкости [8]. Недостатки этих систем очевидны, так как любое энергопотребление нелогично для оптимизации накопленной мощности.

Возникают вопросы, можно ли добиться такого же эффекта охлаждения пассивным способом. Несмотря на это, некоторые из этих систем были признаны экономически эффективными для повышения эффективности преобразования.



Рисунок 2. Принудительное воздушное охлаждение.

Пассивные методы водяного охлаждения, при которых принудительная конвекция реализуется без энергопотребления и охлаждения за счет проводимости с помощью пассивных устройств теплопередачи. Для конвекционного охлаждения предпочтительной рабочей жидкостью является вода, где поток чаще всего приводится в движение под действием силы тяжести. Погружные исследования имели ограниченный успех, так как интенсивность инсоляции падает с глубиной, где при глубине 4 см в 30°C вода дает 11% увеличение эффективности [9]. Опубликованных

исследований по гравитационному фотоэлектрическому водяному охлаждению не так уж много, так как эти системы очень специфичны по местоположению и нуждаются в водохранилище с поднятой дождевой водой на холме или на крыше, расположенном над модулями. Несмотря на это, все, что указано выше для эффективных параметров активного водяного охлаждения, может быть применено к гравитационным потокам. Интересным является исследование прототипа системы охлаждения дождевой воды, использующей газовую расширительную камеру для управления потоком над модулями по мере расширения газа при высоких температурах. Схема этой системы показана на Рисунке 3. (схема слева). Идея создания паровой камеры, приводимой в движение, возникла из научной работы "Технология пассивного охлаждения фотоэлектрических панелей для бытовых домов", написанной Шэньи Ву и Чэнгуан Сюном и опубликованной в международном журнале "Низкоуглеродные технологии" [10]. В настоящее время фронтальное водяное охлаждение фотоэлектрических модулей является одним из наиболее перспективных вариантов охлаждения, поэтому был проведен его анализ для данного исследования.



Рисунок 3. Пассивная система охлаждения дождевой водой для бытовых домов.

PV / T системы используются для повышения эффективности путем сочетания фотоэлектрических и солнечных тепловых. Ученые [11] пытались охладить фотоэлемент с помощью термосифонного эффекта, Рисунок 4. Использовался кремниевый фотоэлектрический модуль общей площадью 0,260 м², с медным листом и трубками, установленными на задней стенке

модуля, и термосифонной водяной системой емкостью 80 литров. Прирост относительного КПД составил 19%. Было доказано то, что термосифоны, как и газовая расширительная камера, упомянутая выше, могут эффективно управлять потоком воды при нагревании солнцем. Тем не менее, эти системы будут представлять проблемы с затратами и количеством материалов, необходимых для охлаждения термосифонов. Другие пытались смягчить высокие температуры фотоэлементов, одновременно сохраняя тепловую энергию солнца. Однако было отмечено, что эти фотоэлектрические элементы требуют более высокой рабочей температуры для снабжения полезного тепла, в результате чего выигрыш от охлаждения ограничен. Более того, более высокие первоначальные инвестиции по сравнению с другими вариантами охлаждения, а также общее повышение эффективности системы с помощью PV/T технологии вносят вклад в тепловую энергию, а не в электричество [12]. Это делает PV/T неэффективной технологией для первоначальных целей. Поэтому, поиск простого и осуществимого способа охлаждения фотоэлектрического модуля без дополнительных затрат энергии все еще является очень востребованным. Такие системы часто приводят к несколько более эффективной системе в целом, чем другие варианты, но фотоэлектрические и солнечные тепловые компоненты менее эффективны в фотоэлектрических и тепловых системах. Это связано с высокой рабочей температурой тепловой системы, необходимой для обеспечения ее эффективности. Другие проблемы связаны со сложностью этих систем, требующей регулярного технического обслуживания и больших начальных инвестиций.



Рисунок 4. PV/T с термосифоном.

Для охлаждения материалов с фазовыми изменениями (PCM) используются материалы с фазовыми изменениями, такие как парафин, для снижения температуры фотоэлементов. PCM обладают высокой теплоемкостью, сохраняя ту же температуру, при которой материал изменяет фазы от твердого к жидкому. На Рисунке 5 показаны парафин и алюминиевая стружка, которые использовались для охлаждения задней стенки фотоэлектрического модуля [13]. Кроме того, для повышения проводимости были установлены вертикальные алюминиевые ребра. Усиление мощности было выше на 9,7 %, чем из эталонного фотоэлектрического модуля [13]. В работе [14] авторы представили снижение температуры на 15 °С с соответствующим материалом PCM в течение 5 часов при инсоляции 1000 Вт/м² с 50 мм материала PCM с обратной стороны. Проблема PCM заключается в том, что они только поглощают тепло, поэтому после нагревания их охлаждающая способность становится бесполезной. В конечном счете, во второй половине дня, нагреваются до такой степени, что на самом деле нагревают панель, а не охлаждают ее.



Рисунок 5. PCM и алюминиевые ребра, используемое для охлаждения фотоэлектрической системы.

Тепловые трубы являются перспективным методом пассивного охлаждения фотоэлектрических модулей и часто используются для охлаждения ряда электронных устройств, таких как компьютеры. Тепловые трубы - это теплопередающее устройство, состоящее из металлической оболочки, фитильной конструкции и рабочей жидкости. Оболочка и фитиль обычно медные или алюминиевые, а рабочая жидкость может быть хладагентом или чаще всего просто водой. Большинство применений, и для целей этого проекта, используются тепловые трубы она состояла из медной оболочки и фитиля, причем в качестве рабочей жидкости использовалась вода. Двухфазное устройство передачи тепла, горячий конец тепловой трубы испаряет рабочую жидкость, в то время как холодный конец конденсирует жидкость. Поток обратно к испаряющемуся концу приводится в движение с помощью капиллярного действия. Это приводит к сочетанию фазового перехода охлаждения вместе с конвекцией охлаждающей среды, выделяющей тепло в окружающую среду. Было обнаружено, что тепловые трубы имеют от 100 до 1000 раз большую способность переноса теплового потока, чем у твердого медного стержня того же диаметра [15]. Точно так же алюминиевые радиаторы часто используются в узлах тепловых труб для рассеивания тепла в окружающую среду через ребра. Некоторые попытки охладить фотоэлектрические модули с помощью тепловых труб и радиаторов предпринимались и ранее. Примечательно, что Henandez и компания [16] использовали радиаторы, состоящие из алюминиевых ребер с нанесенной термической смазкой, и зафиксировали увеличение электрической эффективности на 9%. Это увеличение электрической эффективности ускользает от дальнейшего охлаждения потенциала с использованием тепловых труб. В работе [17] узел тепловой трубы был использован для охлаждения концентрирующей фотоэлектрической системы, которая использует линзы и зеркала для значительного увеличения солнечной интенсивности. В этом случае солнечное излучение фокусируется на одной ячейке, которая была охлаждена узлом тепловой трубы. Аналогично, в работе [18] массив микро тепловых труб был использован для охлаждения примерно четырех фотоэлементов общей площадью около 0,09 м², что привело к снижению температуры ячейки на 4,7 °С и увеличению абсолютного КПД на 2,6%. Проблема заключается в том, что охлаждаемая область была очень мала по сравнению со стандартным фотоэлектрическим модулем, поэтому возможность экономичного использования теплового трубчатого фотоэлектрического охлаждения в больших масштабах не анализировалась. Один из самых больших аттрактантов для исследования

этого метода охлаждения с медными тепловыми трубами и алюминиевыми теплоотводами на полноразмерном модуле обусловлен их выдающейся надежностью, поскольку эти системы должны длиться весь срок службы фотоэлектрического модуля с нулевым дополнительным обслуживанием. Кроме того, в последние годы стоимость тепловых труб снизилась, а их производительность возросла.

3.1 Параметры эффективности и параметры настройки тестирования

Для правильного тестирования модулей существует множество параметров и переменных, однако стандартов не существует. Это приводит к появлению разнообразных методов тестирования и средств отчетности об эффективности систем ФЭ охлаждения. По этой причине в данном отчете необходимо учитывать полученную мощность на единицу площади, относительную и суммарную эффективность, стоимость на единицу площади, снижение срока окупаемости, температурные коэффициенты, а также снижение температуры и некоторые другие существенные факторы такие измерения, как случайное облучение и температура окружающей среды.

Условия тестирования должны были контролироваться для получения значимых и воспроизводимых результатов. На распределение температуры для работающего фотоэлектрического модуля влияют ветер, прерывистый солнечный свет, рама модуля и монтажные кронштейны [19]. В предыдущих исследованиях были приведены некоторые стандарты тестирования внутри помещений. Часто модуль, который освещался с помощью солнечного симулятора, а затем также нагревался сзади, со стандартным распределением солнечной энергии при облучении 1000 Вт/м^2 . Также стандартным является размещение термopара на обратной стороне рабочей поверхности модулей.

Солнечный симулятор, который был использован в этом эксперименте, показан на Рисунке 6. Этот DIY солнечный симулятор состоял из высококачественной светодиодной лампы, отражающих майларовых листов и картона для строительства стен. Использованная светодиодная лампа для выращивания была подвешена к подвесному потолочному каркасу в

Энергетической Лаборатории Профессора Ричарда Уилкса. Световой туннель для коллектора помогал направлять свет и состоял из отражающего майлара и картона. Эта система, безусловно, не совершенна, коммерчески доступные солнечные тренажеры могут стоить сотни тысяч долларов. Тем не менее, это солидная DIY установка, которая обеспечила достаточное облучение и тепло для целей данного исследования.



Рисунок 6. Пример солнечного симулятора DIY.

3.2 Сравнительное исследование системы охлаждения ФЭ

В попытке эффективного охлаждения фотоэлектрических модулей был проведен целый ряд исследований, в результате которых было получено большое разнообразие представленных деталей и методов сбора данных. Это затрудняет объективное сравнение большей части предыдущей работы по охлаждению фотоэлектрических модулей. Лишь в немногих предыдущих исследованиях были сделаны полные расчеты полученной мощности, относительного и общего повышения эффективности [8].

Целью эксперимента было создание прототипа трех различных систем фотоэлектрического охлаждения, изучение эффективности и целесообразности каждой из них в надежде на дальнейшее развитие и

внедрение методов фотоэлектрического охлаждения. Сначала был построен контролируемый испытательный участок, ранее упомянутый, с использованием искусственного светодиодного солнца внутри коробки, сделанной из светоотражающей майларовой обертки, прикрепленной к картону.

Это позволило создать стабильную среду для тестирования фотоэлектрических систем охлаждения, в которой температура окружающей среды колебалась около 35°C. Измерения температуры вблизи углов и центра, а также были взяты показания выходной мощности. Важно было отметить температуру окружающей среды и количество падающего солнечного излучения. После этого было проведено базовое тестирование на 60-ваттном монофазном модуле altE. При этом модуль тестировался с подключенным резистором пиковой мощности 5,3 Ом, а также без подключенного резистора.

Как и предполагалось, при подключении модуля к резистору пиковой мощности наблюдалось повышение температуры поверхности на 20°C. В частности, в построенном солнечном симуляторе температура задней поверхности достигала 66°C при подключенном резисторе. Затем были смоделированы, прототипированы и сконструированы интересные системы охлаждения. Здесь все дальнейшие испытания завершались подключением резистора пиковой мощности, имитирующего повторное использование. В первом методе охлаждения, который был проанализирован, использовался большой алюминиевый радиатор, расположенный на задней панели монофазного модуля.

Следующим методом охлаждения была комбинация большого алюминиевого радиатора в комбинации с плоскими медными тепловыми трубами. Для целей исследования тепловые трубы были прикреплены к задней части ФЭ модуля с помощью упаковочной ленты, где конденсирующий конец тепловых труб был закреплен в алюминиевой раме модуля и к алюминиевому радиатору, центрированному на модуле.

Наконец, был исследован прототип системы водяного охлаждения, состоящей из небольшого погружного насоса, нескольких футов шланга и секции пластиковой трубы с несколькими небольшими отверстиями, просверленными по всей ее длине для равномерного распределения потока воды по рабочей поверхности модулей. Насос был помещен в нижний

резервуар, а модуль находился в большом пластиковом бункере, который сливался в упомянутое выше водохранилище.

3.3 Экспериментальные процедуры. Испытательная установка

Тестирование модулей было завершено на солнечном симуляторе, как показано на Рисунке 7, этот солнечный симулятор состоял из светодиодного источника света с полным спектром и мощностью 1600 Вт от MarsHydro, который был подвешен к металлической решетке, которая была закреплена на потолке лаборатории. Стены были построены вокруг модуля и вырастили свет, чтобы содержать и отражать свет на модуль. Эти стены состояли из отражающих майларовых листов, скрепленных к картону клейкой лентой и шпагатом, удерживая структуру вместе. Как уже говорилось ранее, коммерчески доступные солнечные тренажеры могут стоить сотни тысяч долларов. Светодиодный свет предпочтительнее в этом исследовании по сравнению с другими вариантами освещения. В результате, накопление тепла в модуле было обусловлено тем, что полупроводники передают свет в электрическую энергию. Вместо того, чтобы просто нагревать здание, как продукт интенсивно горячей окружающей среды.



Рисунок 7. Используемый солнечный симулятор.

Модуль, используемый во время тестирования, представлял собой поликристаллический фотоэлектрический модуль AltE с максимальной выходной мощностью 60 Вт и номинальным выходным напряжением 12 В. Размеры модуля были 670x650x25 мм, с диапазоном рабочих температур от -40°C до 85°C и температурным коэффициентом, равным, дальнейшие технические характеристики модуля можно найти в $P_{max} - (0.410 \pm 0.05)\%/K$. Относительно низкая инсоляция, создаваемая растущим светом, приводила к чрезвычайно малым выходным напряжениям. Что делает их бесполезными для оценки производительности модулей. В результате данный температурный коэффициент был использован для демонстрации влияния на выходную мощность различных методов охлаждения.

3.4 Информация DAQ и расположение термопара

Для сбора данных использовался вычислительный измерительный прибор USB-2408 DAQ. С помощью проб и ошибок было выбрано время работы 2 часа 30 минут при частоте сканирования 0,05 Гц для адекватного тестирования различных систем охлаждения. Это обеспечило достижение стабильного состояния для каждого метода. Для большинства проанализированных охлаждающих аппаратов модуль в солнечном симуляторе достиг стабильного состояния (примерно через 1 час).

Четыре термопары типа-K использовались во время большинства модульных испытаний. В каждом случае, зонд типа-K был закреплен в углу модуля, выдвигаясь для измерения условий окружающей среды. Три другие, неизолированные провода, термопары Type-K были закреплены с задней стороны модуля с помощью ленты Karton. Одна из них была прикреплена к центру модуля, другая примерно в 8 дюймах от угла, а третья - в 4 дюймах от того же угла. Был выбран градиент температуры от центра модуля до его краев. С тех пор алюминиевая рама естественным образом действует как теплоотвод. Для охлаждения тепловых труб были протестированы различные места расположения термопара вокруг тепловых труб, чтобы исследовать их

эффективность в передаче тепла. Кроме того, пять Type-K были использованы для правильного анализа метода охлаждения воды, так как дополнительный зонд Type-K был размещен в резервуаре с погружным насосом для измерения температуры воды. Термопары и DAQ, использованные во время испытаний, имеют высокий уровень точности, что гарантирует правильные результаты.

3.5 Алюминиевая радиаторная раковина (пассивное охлаждение)

Первый и самый простой метод охлаждения, который был проанализирован, состоял из большого алюминиевого радиатора, расположенного в центре задней поверхности модулей. В частности, использованный теплоотвод был изготовлен из натурального алюминия, имел размеры 400x200x50 мм, а также рифленые ребра, увеличивающие скорость теплопередачи. Стоимость этого теплоотвода составляла 60,00 долларов. Изначально этот теплоотвод выбирался для встраивания в него большой теплоотводной трубы, однако это не преследовалось из-за необходимости технической обработки с риском повреждения теплоотвода. Кроме того, из-за больших размеров радиатора, модуль опирался на радиатор в горизонтальном положении. Вместо того, чтобы закреплять теплоотвод, чтобы модуль можно было установить на реалистичный наклон, увеличивая тем самым воздействие на окружающую среду. В конце концов, большой радиатор оказался адекватным для анализа возможностей охлаждения ФЭ радиатора.

3.6 Труба нагрева из меди и алюминиевый радиатор комбинированного пассивного охлаждения

Следующая система охлаждения, которая была изучена, состояла из медных тепловых труб и того же алюминиевого радиатора, о котором упоминалось ранее. Медные тепловые трубы, использованные в этой установке, были плоскими тепловыми трубами 50 Вт 3x8x250 мм, где

внутренним фитилем была медь с водой в качестве рабочей жидкости. Двенадцать из этих тепловых труб были использованы. Плоские тепловые трубы были выбраны для увеличения площади контакта с задней частью модуля и радиатором. На Рисунке 8 показаны две различные ориентации тепловых труб и радиатора, которые были проанализированы. Первая, показанная на правой стороне страницы, имела радиатор, центрированный на задней стороне модулей, при этом одна тепловая трубка использовала радиатор для извлечения избытка, поместив конденсирующий конец тепловых труб между ребрами, еще две тепловые трубки были размещены для использования алюминиевой рамы для извлечения тепла из конденсирующего конца этих тепловых труб. Другая показанная настройка включала в себя простое размещение радиатора под тремя трубами. Эта установка штабелирования оказалась менее эффективной, чем первая на несколько градусов Цельсия, и значительно уменьшила площадь охлаждающей поверхности.



Рисунок 8. Установки для тестирования тепловых труб и радиаторов.

3.7 Охлаждение трубы со встроенным медным теплообменником

Далее было исследовано охлаждение встроенной тепловой трубы. В этом случае были просверлены отверстия в алюминиевой раме модуля для надежной фиксации тепловых труб. Это позволило конденсирующимся концам тепловых труб подвергнуться испытаниям в условиях окружающей среды, как показано на Рисунке 9. Такая установка является наиболее логичной и была продолжена только на поздних стадиях данного исследования. Первоначально, никакие постоянные изменения в модулях не были желательными, так как модуль будет использоваться в будущих академических исследованиях. Поэтому в результаты для комбинированного охлаждения тепловых труб и радиаторов включены только данные из установки, в которой конденсационный конец тепловых труб был закреплен на радиаторе и раме.



Рисунок 9. Улучшенная настройка тестирования тепловых труб.

3.8 Активное водяное охлаждение с помощью погружного насоса

Было исследовано активное охлаждение воды. Установка, показанная на Рисунке 10, состояла из небольшого погружного насоса, расположенного в резервуаре, мусорном баке. Вода закачивалась через прозрачную трубу Тайгона. Трубка была закреплена на расходомере с присоединенными медными фитингами, которые оттуда подавались в трубу диаметром полсантиметра, закрепленную в верхней части модуля. Вода распределялась по рабочей поверхности по трубе с отверстиями диаметром 1/16 см, вырезанными по прямой линии, разделенной примерно на 1/4 см каждое. Модуль был помещен в контейнер, который сливал воду в резервуар, чтобы система могла работать непрерывно, без необходимости в большем количестве воды.



Рисунок 10. Испытательная установка водяного охлаждения.

В качестве погружного насоса использовался насос Homasu 400GPH мощностью 25 Вт, который работал в режиме ультратихой фонтанной воды и стоил 24,00 долларов. Этот насос обеспечил более чем достаточную

мощность для перекачки воды для одного модуля, он, безусловно, достаточно мощный, чтобы охладить целый ряд модулей в пять раз шире, чем тестируемый модуль. Кроме того, этот недорогой насос контролирует расход с помощью простого пластмассового клапана, который ограничивает впуск. При тестировании использовался расход 0,8 галлона в минуту, что было самым низким показателем, на котором насос мог работать. Кроме того, насос постоянно потребляет 25 Вт, что крайне избыточно для охлаждения одного модуля мощностью 60 Вт и вовсе не эффективно для снижения срока окупаемости. Несмотря на нереалистичный характер этой конкретной тестовой установки, все равно было важно провести анализ, поскольку водяное охлаждение в настоящее время является наиболее популярным вариантом в реальных фотоэлектрических системах охлаждения. Остальные компоненты этой системы водяного охлаждения, кроме насоса, были поставлены Лабораторией энергии профессора Ричарда Уилка. В целом, эта система добилась успеха в значительном снижении температуры рабочей ячейки. Несмотря на трудности равномерного распределения воды по всему модулю, которые будут рассмотрены далее в разделе "Обсуждение результатов".

4 Презентация результатов и анализ

Результаты, показанные на Рисунке 11, показывают устойчивое состояние температуры в градусах Цельсия в центре или области, где применялось охлаждение. Также отображается соответствующая выходная мощность для данного конкретного метода охлаждения. Гистограмма расположена с наиболее эффективным охлаждением в верхней части, где базовая температура, а не охлаждение в нижней части. Как видно, активный метод охлаждения водой был наиболее эффективным. Кроме того, различные методы пассивного охлаждения, использующие тепловые трубы и теплоотводы, дают одинаковые результаты. Эти результаты были лишь незначительно менее эффективными при понижении температуры модуля, чем при охлаждении водой. В конце концов, все настройки значительно снизили температуру рабочей ячейки модуля по сравнению с базовым тестированием без применения охлаждения.



Рисунок 11. Температура и выходная мощность для каждого проверенного метода охлаждения.

4.1 Обсуждение результатов

Результаты показывают, что эти методы охлаждения ФЭ имеют ряд перспективных признаков. Несмотря на это, несомненно, существует ряд способов улучшения данного исследования для получения более точной и полезной информации.

Данное исследование продемонстрировало возможность экономически эффективного охлаждения с использованием тепловых труб, теплоотводов и активного водяного охлаждения. Водяное охлаждение оказывается наиболее эффективным при снижении температуры рабочей камеры, и его следует осуществлять при следующих обстоятельствах, в горячей среде, где вода легко доступна и легко хранится. Кроме того, водяное охлаждение особенно полезно для охлаждения больших массивов с большой площадью поверхности. В идеале, гравитационное охлаждение подается из поднятого резервуара на холме или крыше, чтобы не потреблять энергию насоса. Несмотря на это, другие исследования показали, что стоит отказаться от некоторой мощности мощных насосов для активного водяного охлаждения. В тропической влажной среде водяное охлаждение, безусловно, является предпочтительным методом ФЭ охлаждения.

С другой стороны, во многих областях, где охлаждение ФЭ представляет интерес, окружающей среде не хватает воды для охлаждения. Например, засушливые пустыни и равнины. В этих областях результаты показывают, что пассивное охлаждение проводимости со встроенными тепловыми трубами является логичным выбором. Важно отметить, что алюминиевый радиатор среднего размера должен быть сфокусирован на задней части модуля с плоскими тепловыми трубами, встроенными в радиатор, и алюминиевой рамой модуля, чтобы лучше всего снизить температуру рабочей ячейки. Такой вывод был сделан по нескольким причинам. Во-первых, в данном исследовании охлаждение тепловых труб состояло только из трех-четырех тепловых труб, охлаждая только один квадрант модуля, а не весь его. Кроме того, более крупные тепловые трубы, чем используемые 250-миллиметровые, 50-ваттные, довольно дорогие и хрупкие, поэтому для того, чтобы удержать первоначальную стоимость, недорогая алюминиевая тепло увеличило бы площадь охлаждаемой поверхности, подверженной воздействию охлаждающего окружающего воздуха. Помогает равномерно распределить тепло по задней части рабочей

поверхности. Встроенные в раму тепловые трубы, очень эффективны для передачи тепла, но когда они не выступают из модуля рамы, они фактически имеют тенденцию сдерживать и накапливать тепло вблизи конденсирующегося конца. Результаты данного исследования показали, что правильно размещенные тепловые трубы лишь немного менее эффективны, чем активное водяное охлаждение. Поэтому во многих сценариях комбинированные встроенные тепловые трубы и теплоотводы должны быть предпочтительным выбором в методе охлаждения. Тем более, что технология тепловых труб продолжает снижать цену по мере совершенствования технологии производства.

Как указывалось ранее, существует ряд способов повышения точности этого проекта. Улучшенный имитатор солнечной энергии также повысил бы достоверность этого исследования. Низкая инсоляция, обеспечиваемая растущим светом, привела к чрезвычайно малому выходному напряжению на резисторе пиковой мощности, что делает их практически бесполезными для анализа. Светодиод 1600W MARS Hydro только производит инсоляцию в то время как стандартные условия тестирования (200 Вт/м^2). Кроме того, в закрытой установке, был застойный воздух, когда в реальной жизни (1000 Вт/м^2) модули будут подвергаться хотя бы небольшому воздействию ветра, что увеличивает скорость охлаждения.

Кроме того, при испытательной установке не удалось достичь такой же постоянной температуры в плоском и наклонном положении. Когда тестирование было завершено в плоском положении, температура в устойчивом состоянии была примерно выше, чем при установке под углом 45° , как это требуется для охлаждения водой (10°C).

Далее углы и края модуля естественно имеют более низкую температуру, чем центр модуля. В результате, это исследование было бы улучшено, если бы все методы охлаждения анализировались точно по центру модуля. Вместо того, чтобы применять охлаждение к одному квадранту модулей в обратном направлении, как это было сделано при использовании методов охлаждения с помощью тепловых труб.

Кроме того, более надежные и реальные средства крепления методов охлаждения к модулю принесут лучшие результаты. Тепловые трубы были закреплены уплотнительной лентой, модуль был просто помещен на большой теплоотвод, а метод водяного охлаждения был прикреплен сверху с помощью клейкой ленты. Лента почти наверняка изолировала охлаждающую

аппаратуру. Маленький насос, который потреблял меньше энергии, позволял бы лучше анализировать и сравнивать экономическую эффективность и срок окупаемости каждой системы охлаждения. Насос мощностью 25 Вт, используемый во время тестирования, мог бы легко охладить участок в пять раз больше, чем один модуль.

Аналогичным образом, при тестировании активного водяного охлаждения было трудно равномерно распределить поток по всей рабочей поверхности. Большая часть воды, вытекающей из отверстий, закрывала насос и удалялась от него, оставляя середину относительно сухой. После устранения неполадок эта проблема была в значительной степени смягчена за счет сверления отверстий под ранее просверленными отверстиями в местах с плохим потоком.

Кроме того, более последовательное и точное размещение термопара улучшило бы это исследование. Была предпринята попытка как можно лучше закрепить термопары в одних и тех же местах для разных методов, но при переходе на другой метод охлаждения термопары часто отваливались. Кроме того, солнечный симулятор с находящимся в нем модулем очень плотный, что делает его жестким, чтобы обеспечить надлежащее размещение термопара с некоторыми видами охлаждения, таких как активное водяное охлаждение. Оглядываясь назад, места расположения термопара должны были быть обозначены маркером с самого начала испытаний.

Более того, в этом исследовании не было возможности встраивать тепловые трубы в теплоотвод или быть в состоянии построить теплоотвод вокруг тепловой трубы. Процессы обработки достаточно сложны, и особенно сложно работать с тонкими алюминиевыми листами, которые предпочтительно использовать при конструировании радиатора.

Точно так же большой масштаб этих проектов ограничивает сложность анализируемых методов охлаждения. Для проекта один или два метода охлаждения должны быть смоделированы действительно хорошо, вместо того, чтобы пытаться протестировать и сравнить четыре простые системы охлаждения. Потребовалось бы больше финансирования и времени для более точной проверки реальной эффективности этих методов охлаждения ФЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из самых больших проблем с ФЭ является значительное снижение выходного напряжения по мере повышения температуры рабочей ячейки. Это приводит к общему большому снижению выходной мощности модуля при заданном количестве падающей солнечной инсоляции. Это было приравнено к снижению эффективности преобразования фотоэлектрических модулей примерно на 0,4-0,5% при каждом градусе повышения температуры [2]. Следовательно, многие исследовали ряд возможных методов охлаждения для ФЭ.

Целью данного исследования было сравнение наиболее перспективных методов охлаждения ФЭ, в надежде получить лучшее представление о них и помочь в дальнейшем развитии эффективности охлаждения ФЭ. В последние годы возросла вероятность широкого применения фотоэлектрического охлаждения. Продолжая расти по мере роста популярности форм возобновляемой энергии, стоимость фотоэлектрических модулей уменьшается с улучшением технологии производства, улучшением технологии охлаждения, а также с ростом температуры во всем мире, которая становится более высокой и экстремальной.

Использовались: 1) Алюминиевые теплоотводы 2) Встроенные тепловые трубы 3) Комбинированные тепловые трубы и радиатор 4) Активное охлаждение воды. Результаты показали, что активное водяное охлаждение является наиболее эффективным методом охлаждения и должно продолжаться. Однако активное охлаждение водой часто не является практичным. Для эффективного охлаждения активной водой окружающая среда должна иметь постоянный запас прохладной воды, который должен быть большим, чтобы компенсировать малый расход энергии насоса. Во многих сценариях наиболее практичным было бы охлаждение с помощью встроенных тепловых труб и алюминиевого радиатора среднего размера. В засушливых условиях, с нехваткой воды и сильным ветром, этот метод является логичным выбором. Как и в случае со многими другими инженерными решениями, правильный выбор ФЭ охлаждения зависит от ряда последствий для окружающей среды.

К сожалению, есть несколько важных моментов, которых не хватает в этом исследовании из-за недостатка финансирования. В основном, неспособность по-настоящему получить точное представление о различных

сроках окупаемости и экономической эффективности исследуемых методов охлаждения. Это связано с неспособностью снизить энергопотребление насоса по отношению к расходу. Используемый насос мог легко охладить большую площадь, по крайней мере, в пять раз большую, чем размер модуля, на котором было завершено тестирование.

Кроме того, инсоляция, обеспечиваемая светодиодом, является частью того, что модуль будет подвергаться воздействию снаружи в солнечный день. В действительности, коммерчески доступные солнечные симуляторы могут стоить сотни тысяч долларов.

Будущие исследования должны быть сосредоточены на одном из двух перспективных методов охлаждения - активном охлаждении водой и комбинированном охлаждении встроенными тепловыми трубами и раковинами. Оптимизация каждого метода, с тем, чтобы при необходимости можно было использовать его в больших масштабах по всему миру. Реальность такова, что будущее мира находится под вопросом, поскольку мы продолжаем небрежно сжигать ископаемое топливо и загрязнять окружающую среду на бесчисленных уровнях. Это зависит от нас, как от инженеров, которые получают образование, чтобы уменьшить бремя человечества на нашу окружающую среду и продлить наше существование здесь. То, как мы производим электроэнергию, нуждается в изменении, солнечные фотоэлектрические батареи и другие возобновляемые источники энергии нуждаются в дальнейшем совершенствовании для экономически эффективного удовлетворения спроса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Dubey, Swapnil, Jatin Narotam Sarvaiya, and Bharath Seshadri. "Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review." *Energy Procedia* 33 (2013): 311-321.
- 2 Notton G, Cristofari C, Mattei M, et al. Modeling of a double-glass photovoltaic module using finite differences, *Appl Thermal Eng* , 2005, vol. 25 (pg. 2854-77)
- 3 <http://www.seaward-groupusa.com/userfiles/curve-tracing.php>
- 4 Bahaidarah, Haitham MS, Ahmer AB Baloch, and Palanichamy Gandhidasan. "Uniform cooling of photovoltaic panels: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (2016): 1520-1544.
- 5 Wohlgemuth, John H., et al. "Long term reliability of photovoltaic modules." *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on* . Vol. 2. IEEE, 2006.
- 6 Chandel, S. S., and Tanya Agarwal. "Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73 (2017): 1342-1351.
- 7 Mazón-Hernández, R. et al. Improving the Electrical Parameters of a Photovoltaic Panel by Means of an Induced or Forced Air Stream, *International Journal of Photoenergy*, 2013.
- 8 Grubišić-Čabo, Filip, Sandro Nižetić, and Tina Giuseppe Marco. "Photovoltaic panels: a review of the cooling techniques." *Transactions of FAMENA* 40.SI-1 (2016): 63-74.
- 9 Rosa-Clot, M., et al., Submerged photovoltaic solar panel: SP2, *Renewable Energy* 35 (2010) 1862–1865
- 10 Shenyi Wu, Chenguang Xiong; Passive cooling technology for photovoltaic panels for domestic houses, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volume 9, Issue 2, 1 June 2014, Pages 118–126, <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctu013>

- 11 El-Seesy, I. E., Khalil, T., Ahmed, M. T., Experimental Investigations and Developing of Photovoltaic/Thermal System, World Applied Sciences Journal 19(9), 1342-1347, 2012.
- 12 Tripanagnostopoulos Y, Nousia T, Souliotis M, et al. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, Sol Energy , 2002, vol. 72 (pg. 217-34)
- 13 Maiti, S., et al., Self-regulation of photovoltaic module temperature in V-trough using a metal–wax composite phase change matrix, Solar Energy 85 (2011) 1805–1816
- 14 Hassan, A., Phase Change Materials for Thermal Regulation of Building Integrated Photovoltaics, Doctoral Thesis, Dublin Institute of Technology, 2010.
- 15 <https://www.enertron-inc.com/products/standard-heat-pipe/>
- 16 Mazón-Hernández, R. et al. Improving the Electrical Parameters of a Photovoltaic Panel by Means of an Induced or Forced Air Stream, International Journal of Photoenergy, 2013.
- 17 Anderson, William G., et al. "Heat pipe cooling of concentrating photovoltaic cells." Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC'08. 33rd IEEE. IEEE, 2008.
- 18 Tang, X., Quan, Z., Zhao, Y., Experimental Investigation of Solar Panel Cooling by a Novel Micro Heat Pipe Array, Energy and Power Engineering, 2010, 2, 171-174.
- 19 King, David L., Jay A. Kratochvil, and William E. Boyson. "Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement methods, difficulties, and results." Photovoltaic Specialists Conference, 1997., Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE. IEEE, 1997.
- 20 <https://www.builditsolar.com/Experimental/SunSim/SunSimFinalPlus>