

Активные методы водяного охлаждения для солнечного фотоэлектрического модуля

Ле Винь Тханг¹, Анатолий В.Щагин¹, Нго Сян Кыонг², Ле Вьет Хай³

¹*Национальный исследовательский университет «Московский Институт Электронной Техники»*

²*Хюэский Университет, Вьетнам*

³*Академия государственной противопожарной службы МЧС России*

Аннотация: В настоящее время широко используются фотоэлектрические системы, но задачи повышения эффективности и снижения стоимости таких систем по-прежнему актуальны. Среди многих методов повышения фотоэлектрической эффективности выделяется метод активного водяного охлаждения, применение которого особенно актуально для Вьетнама и других стран с тропическим климатом. Эта статья посвящена анализу методов активного водяного охлаждения, анализу экспериментального конструирования фотоэлектрических модулей и систем, а также методам повышения эффективности путем применения водяного охлаждения.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, метод водяного охлаждения, активное охлаждение, эффективность.

I. Введение

Различные методы применяются для повышения эффективности фотоэлектрических модулей. Некоторые методы основаны на увеличении излучения на поверхность фотоэлектрических модулей для уменьшения площади фотоэлектрических модулей, что может быть достигнуто с помощью концентратора солнечного излучения, линз и использования солнечного слежения. Эффективным способом повышения эффективности фотоэлектрических модулей является снижение температуры поверхности.

В этой статье рассмотрены методы улучшения характеристик фотоэлектрических модулей с использованием активной системы водяного охлаждения. Активный метод водяного охлаждения может работать с передней поверхностью, задней поверхностью и обеими поверхностями.

II. Подробный литературный обзор активных методов водяного охлаждения для солнечного фотоэлектрического модуля

В этом разделе приводится описание существующих активных методов водяного охлаждения и оценка эффективности фотоэлектрического модуля при использовании каждого метода.

2.1 Активный метод водяного охлаждения лицевой поверхности модуля

В исследовании [1] авторы представляют набор тестовых измерений для выбора схемы охлаждения фотоэлектрического модуля, чтобы обеспечить наилучшую рациональность в однородности водной пленки, снизить температуру модуля, снизить потребление воды и, наконец, максимизировать выходную мощность модуля. Эксперименты проводились с фотоэлектрическим модулем мощностью 230 Вт в лаборатории жидкостных машин и энергетических систем на кафедре промышленной инженерии Падуйского Университета, Италия. После проведения экспериментов результаты показывают, что система охлаждения оснащена тремя характерными форсунками с углом впрыска 90° , работающими при входном давлении 1,5 бар в течение 30 секунд и выключенными в течение 120 секунд, возможно, для уменьшения модуля температуры до 28°C , что повышает эффективность модуля примерно на 14%.

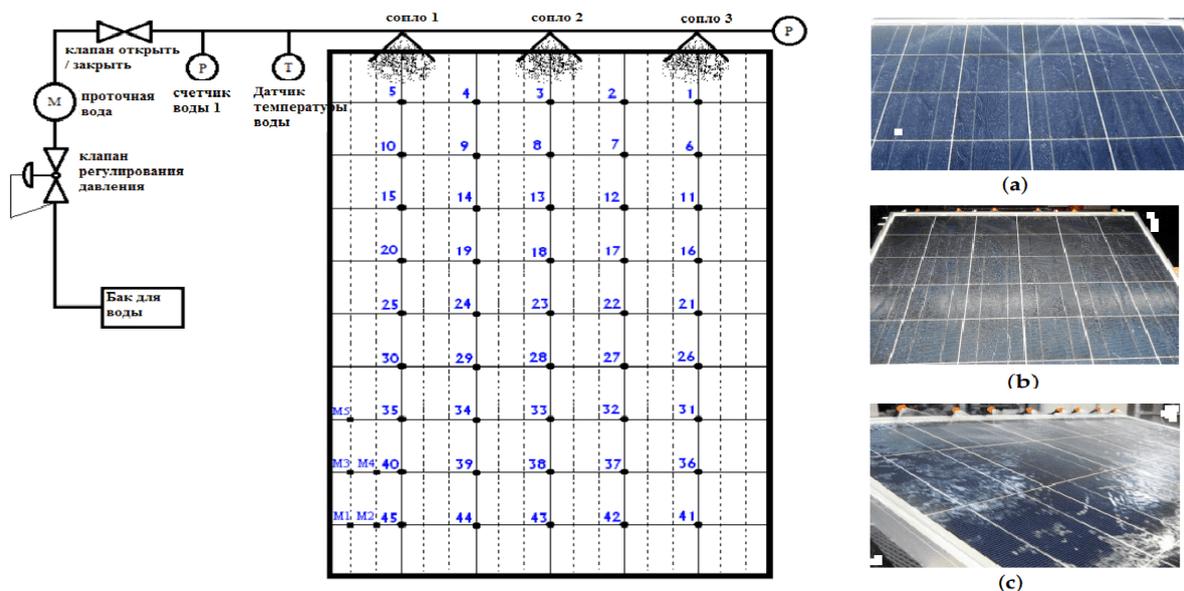
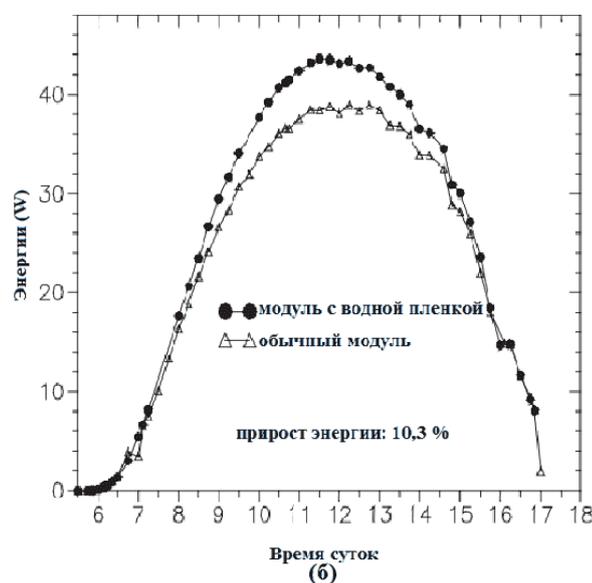


Рис. 1. Тест на распыление водяными форсунками [1]. (а) 2 водяных сопла, (б) 6 водяных сопел, (в) 9 водяных

Краутер [2] разработал активный метод охлаждения воды на поверхности фотоэлектрического модуля потоком пленки. Автор использовал пленку наружного потока, образованную водой на поверхности модуля, вытекающей из сопла, расположенного в верхней части модуля. Экспериментальные результаты показали, что текущая пленка способствует поддержанию чистоты поверхности модуля и снижению потерь на отражение на 2–3,6%. Температура поверхности фотоэлектрического модуля упала до 40 °С, а выход электроэнергии за весь день увеличился на 10,3%.



(а)



(б)

Рис. 2. Создание водной пленки на фотоэлектрическом модуле и мощность в сутки [2]

Одех и Бехния [3] также предложили активный метод охлаждения - метод капания воды. В их системе охлаждения вода подавалась на поверхность фотоэлектрического модуля мощностью 60 Вт, а капельница для воды (диаметр 2,5 см, длина стороны модуля: 65 см) была установлена сверху модуля на наклонной плоскости. Наружная вода течет по поверхности модуля от капельницы к трубе сбора на противоположной стороне, а затем рециркулирует. Поток воды может способствовать охлаждению модуля и увеличению излучения солнечного элемента за счет преломления солнечного света в воде. После

проведения эксперимента результаты показали увеличение выхода системы в диапазоне 4–10%, когда была принята разработанная методика охлаждения и температура фотоэлектрического модуля упала до 32 °С.

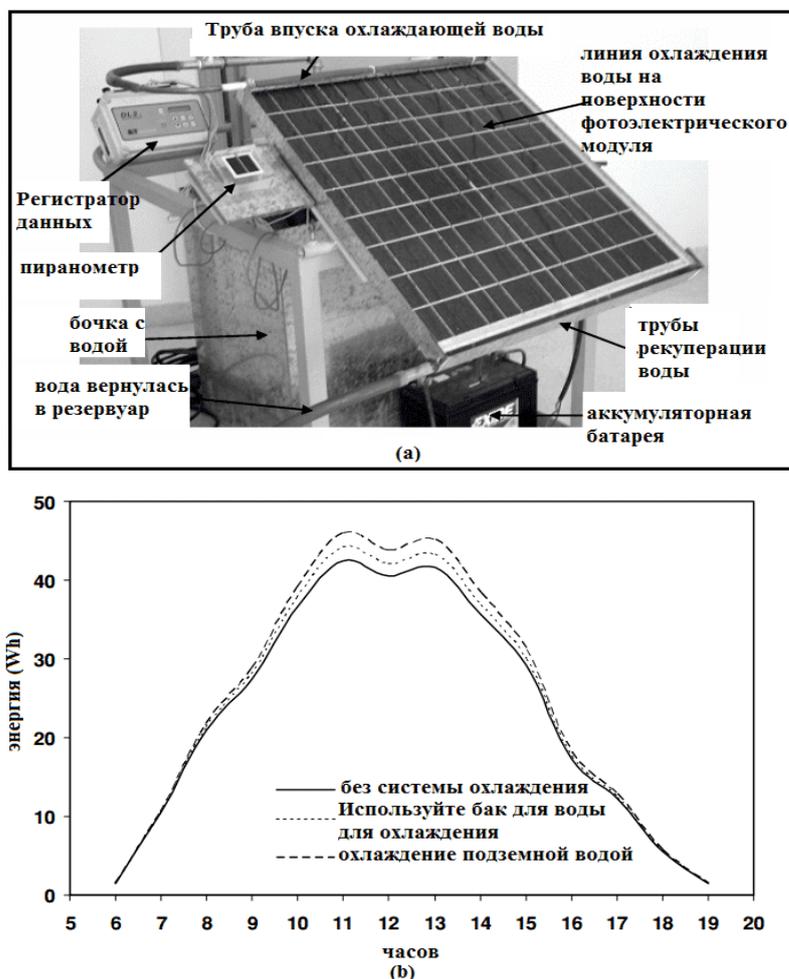


Рис. 3. Тест водяного охлаждения и энергии в день для фотоэлектрического модуля [3]

Доробанту и его коллегам [4] предложили улучшенную эффективность системы фотоэлектрического модуля с одним слоем воды на поверхности фотоэлектрического модуля. Авторы выполнили эксперимент на фотоэлектрическом модуле мощностью 75 Вт, который охлаждается водой, непрерывно наливаемой на поверхность мембраны фотоэлектрического модуля сверху вниз. Система охлаждения для фотоэлектрического модуля состоит из круглой трубки с 25 отверстиями, каждое отверстие имеет диаметр 1,5 мм.

Диаметр круглой трубки составляет 20 мм, а ее длина равна длине фотоэлектрического модуля. Фотоэлектрический модуль монтируется на неподвижной подставке под углом 35°. В ходе эксперимента они использовали средний уровень излучения 780 Вт/м², а скорость воды 33,3*10⁶ м³/с. Результаты показывают, что температура передней поверхности была около 38,5°С и 41,5°С, температура задней поверхности была около 50°С и 52°С, а мощность генерации достигла 73,11 Вт для фотоэлектрических модулей, не использующих систему охлаждения.

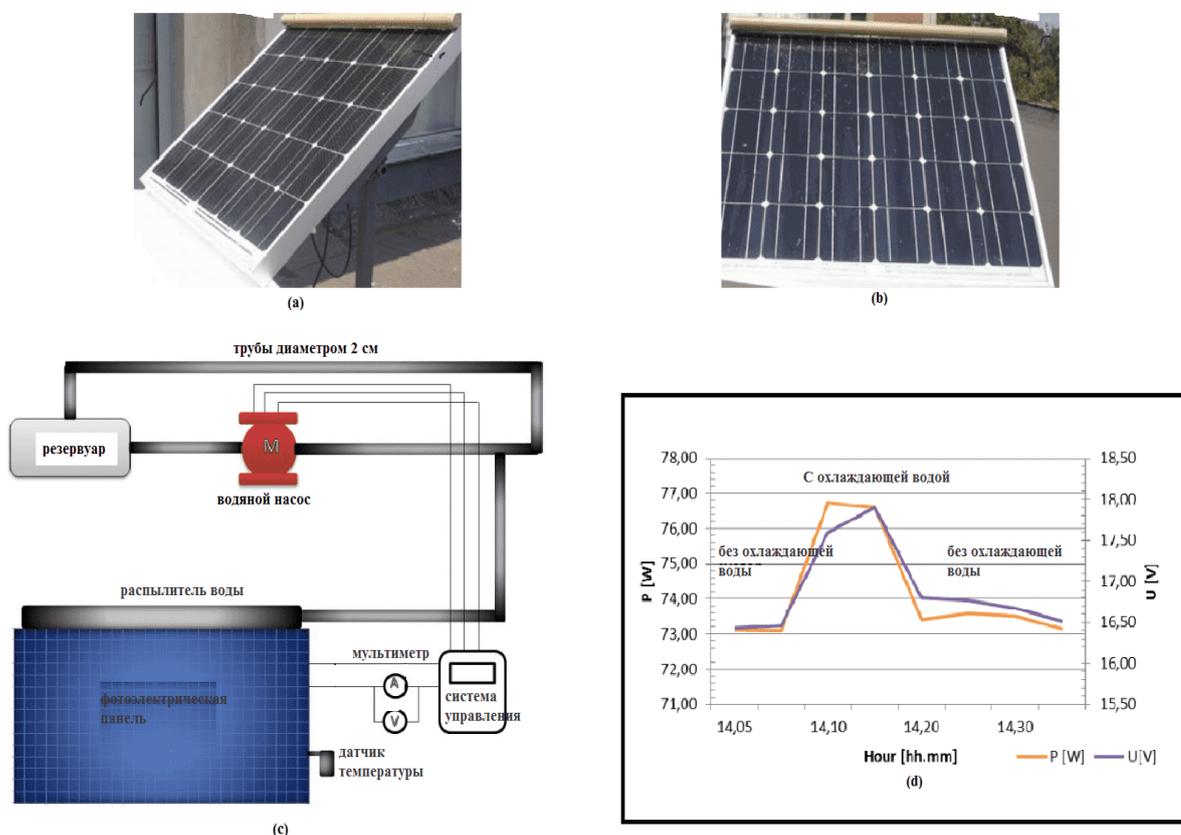


Рис. 4. Система охлаждения и время включения питания [4]. (а) система без водной пленки; (б) система с водной пленкой; (в) принципиальная схема полностью автоматизированной системы; (г) выходная мощность

Для охлаждающего фотоэлектрического модуля температура на передней модуля достигает от 26 до 27°С, температура на задней модуля достигает от 31 до

32,5°C, а генерирующая мощность достигает 76,74 Вт. Эти результаты показывают общее увеличение выходной мощности на 3,5 Вт и около 5,0%.

Мохаррам и его коллеги [5] изучали влияние водяного охлаждения на эффективность шести фотоэлектрических модулей, изготовленных Вр Solar в Немецком университете в Каире (GUC) в Египте. Автором предложена модель для определения максимально допустимой температуры на момент начала распыления воды для охлаждения фотоэлектрического модуля с целью уменьшения количества охлаждающей воды и электрической энергии, необходимой для охлаждения. Они отметили, что скорость нагрева солнечного элемента составляет 6 °C / час, а скорость охлаждения солнечного элемента составляет 2 °C / мин для потока воды 29 л/мин. В испытательной установке использовались шесть монокристаллических фотоэлектрических модулей мощностью 185 Вт и 120 разбрызгивателей для распыления воды на передней поверхности модуля, и было установлено, что скорость охлаждения составляла 2,05 °C / мин.

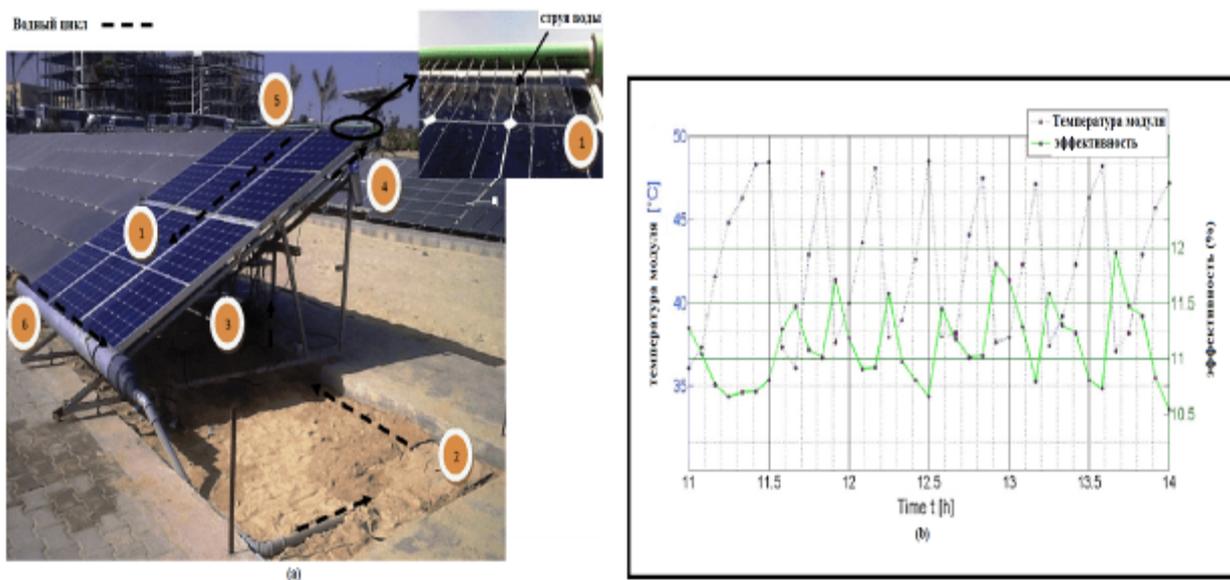


Рис. 5. (а) Экспериментальная установка. (1) фотоэлектрический модуль; (2) бак; (3) насос; (4) фильтр; (5) сопло; (6) сливная труба; (б) Экспериментальные измерения температуры и эффективности модуля в зависимости от времени в июле 2012 года [5]

Предлагаемая система охлаждения снизила рабочие температуры до 10°C в течение 5 минут и увеличила эффективность солнечного модуля на 12,5%. После проведения экспериментов выбор максимально допустимой температуры 45°C дает системе максимальную выходную мощность.

Ирван и его коллеги [6] изучали эффективность фотоэлектрического модуля при комнатных условиях испытаний. Они разработали метод водяного охлаждения с помощью распыления воды на передней поверхности фотоэлектрического модуля. Четыре настройки среднего солнечного излучения на испытательной поверхности солнечного тренажера были созданы из галогенных ламп и измерены четырьмя различными излучениями соответственно 413 , 620 , 821 и 1016 Вт/м². Они использовали насос постоянного тока для поддержания потока воды на солнечной поверхности фотоэлектрического модуля и обеспечения охлаждения. Наименьшее снижение температуры на 5°C для интенсивности 413 Вт/м² и самое большое снижение температуры на 23°C для интенсивности на 1016 Вт/м² были обнаружены по результатам охлаждения.

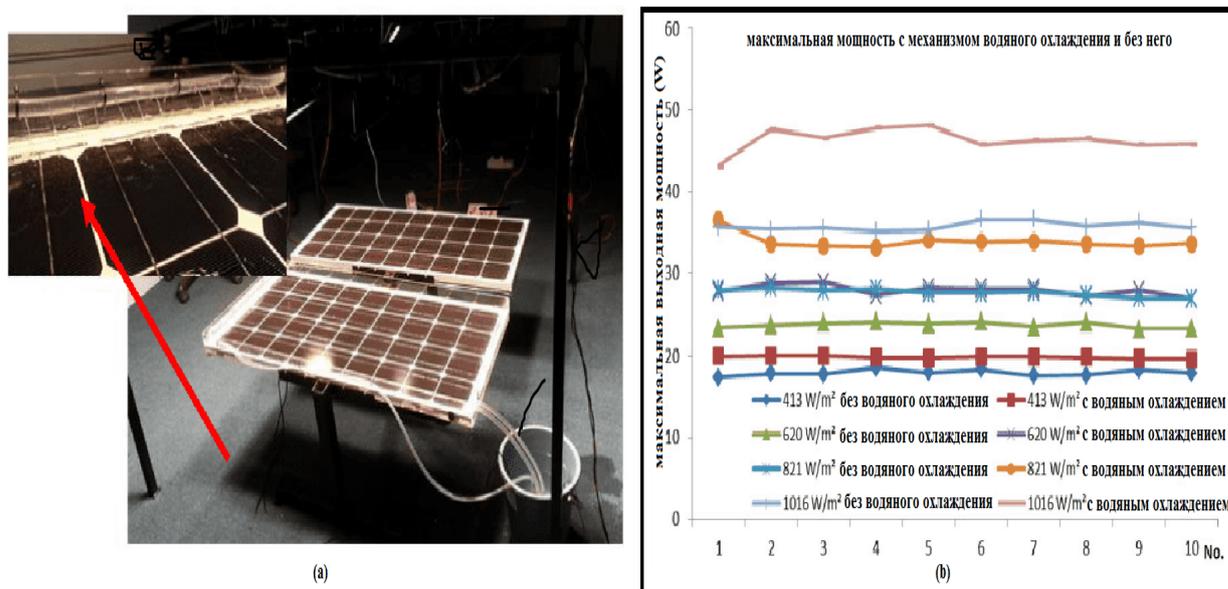


Рис. 6. (а) Фотоэлектрический модуль с охлаждающим механизмом и без него; (б) максимальная выходная мощность фотоэлектрической панели [6]

Экспериментальные результаты также показывают, что фотоэлектрический модуль с предполагаемой системой водяного охлаждения увеличили свою максимальную выходную мощность на 9,8%, 14,9%, 18,2% и 22,8% для излучений 413, 620, 821 и 1016 Вт/м², соответственно.

2.2. Активный метод водяного охлаждения задней поверхности модуля

Бруно и его коллеги [7] изучали эффект водяного охлаждения для фотоэлектрических систем, подключенных к сети, в Центре анализа систем альтернативной энергии, Государственный университет Западной Параны - UNIOESTE, в городе Каскавел, Парана, Бразилия. В ходе экспериментов они использовали две строки фотоэлектрического модуля, каждая из которых состояла из трех фотоэлектрических модулей из поликристаллического кремния по 22 Вт (модель STP022-12 / D, Suntech). Фотоэлектрические модули установлены на подставке под углом 35 ° к северу и подключены к сетевому инвертору 600 Вт (модель SUN-600G-LCD от Masspower). Под одним из модулей была установлена система охлаждения с разбрызгивателями. Система состоит из трех гибких трубчатых рычагов с отверстиями, расположенными вертикально на верхнем крае задней поверхности.

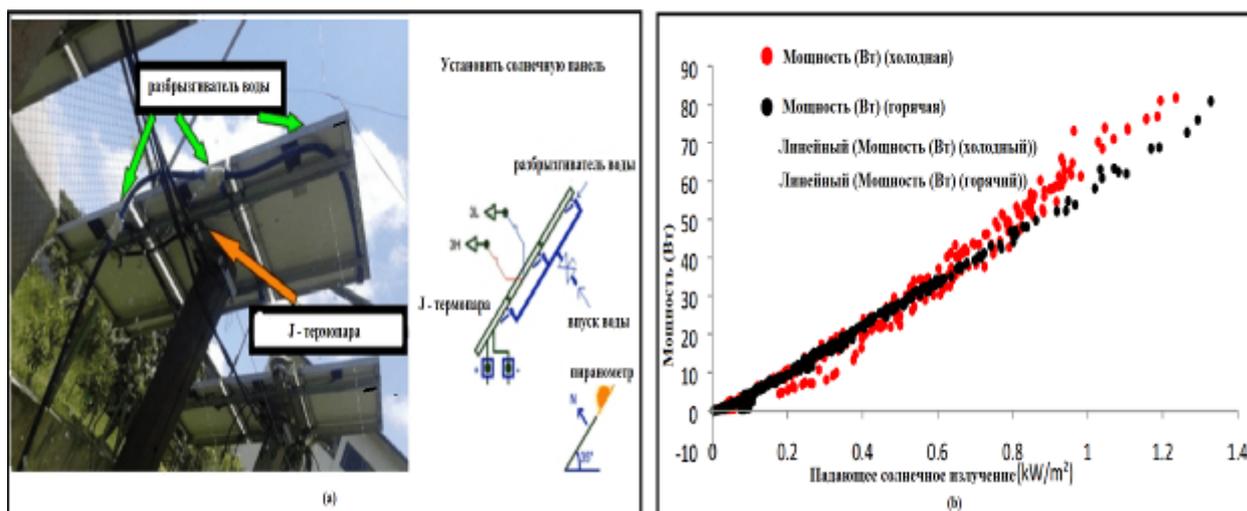


Рис. 7. Установленная спринклерная система и взаимодействие между мощностью и падающим солнечным излучением на фотоэлектрическом модуле [7]

Результаты исследований показали, что при высокой солнечной радиации мощность используемого модуля системы охлаждения сзади увеличивается на 12,3%, а КПД увеличивается на 12,2% по сравнению с неиспользованной системой. При низком солнечном излучении мощность модуля используемой системы с охлаждением на тыльной стороне увеличивается на 8,5%, а КПД увеличивается на 9,1% по сравнению с неиспользованной системой.

Бахайдара и его коллеги [8] исследовали и смоделировали эффект активного охлаждения системы охлаждения (SunDrum Solar, SDM100), прикрепленной к задней части фотоэлектрического модуля на 230 Вт и циркуляционной воды. Система охлаждения установлена на задней части модуля с впускным и выпускным отверстиями для потока воды. Благодаря технологии активного охлаждения максимальная рабочая температура модуля снизилась с 45 °С до 34 °С.

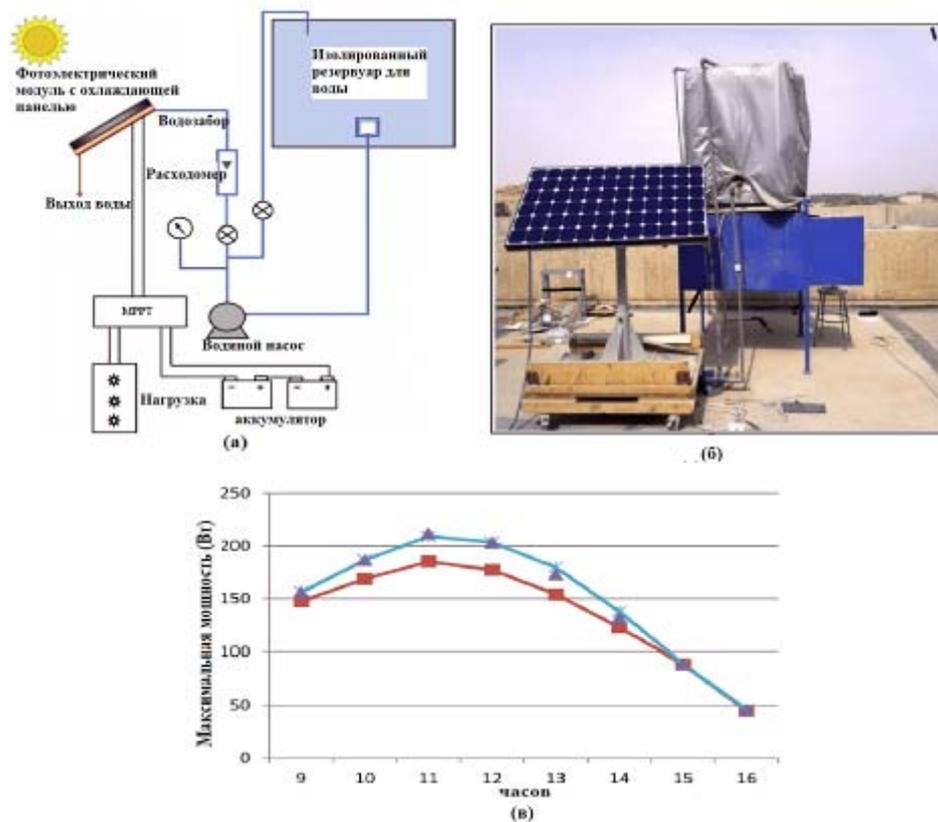


Рис. 8. Экспериментальная настройка и сравнение выходной мощности модуля в течение дня [8]

Экспериментальные результаты показывают, что снижение рабочей температуры примерно на 20% и увеличение электрической эффективности на 9% при использовании системы водяного охлаждения. При уровне освещенности 900 Вт/м^2 мощность используемой модулем системы с охлаждающей водой составляет около 211 Вт, а фотоэлектрической системы без охлаждения - 190 Вт, разница составляет около 10%.

2.3. Активный метод водяного охлаждения двойной поверхности модуля

Ахмед и его коллеги [9] исследовали различные методы охлаждения поликристаллического фотоэлектрического модуля мощностью 20 Вт в погодных условиях ОАЭ. Система охлаждения состоит из системы прямого распыления воды на задней стороне фотоэлектрического модуля и системы распыления воды на передней поверхности. Авторы получили следующие результаты: для эквивалентного солнечного излучения охлаждение заднего модуля может снизить температуру фотоэлектрического модуля на 1,7%, а выходная мощность увеличивается на 2,3% по сравнению со случаем без системы охлаждения водой; для охлаждения на лицевой поверхности температура снизилась на 11,3%, а выходная мощность фотоэлектрических модулей увеличилась на 3,6%; в случае комбинированного охлаждения спереди и сзади температура снизилась на 18,3%, а выходная мощность фотоэлектрического модуля увеличилась на 5,5% по сравнению с системой без системы водяного охлаждения. Вышеуказанные результаты показали, что как переднее, так и заднее охлаждение более эффективны, чем система охлаждения на задней стороне. Это можно объяснить тем фактом, что температура фотоэлектрического модуля более чувствительна к передней поверхности и термодиффузии стекла на передней поверхности фотоэлектрического модуля.

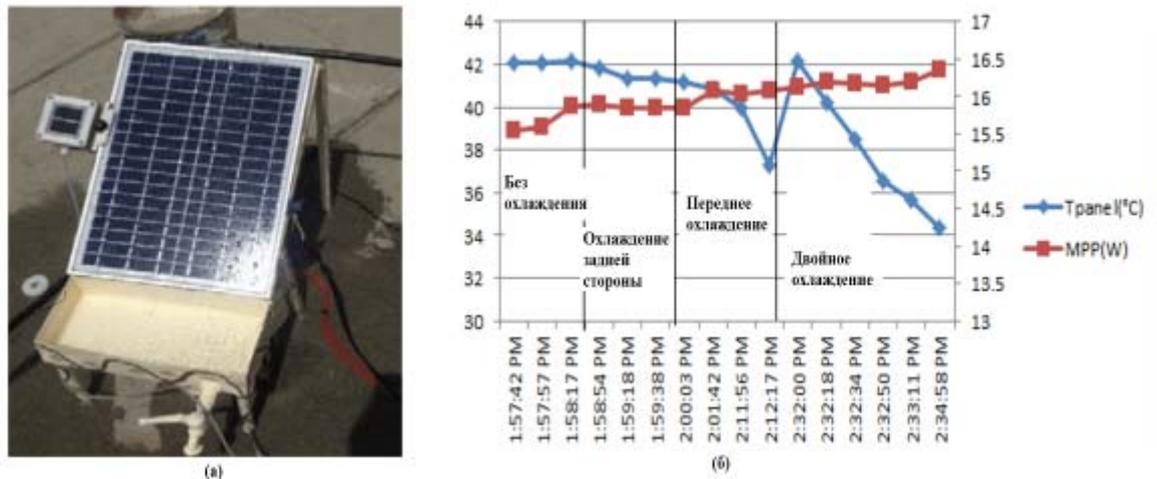


Рис. 9. (а) Фотоэлектрический модуль и система охлаждения; (б) Эволюция температуры модуля и максимальной мощности [9]

Нижегич и его коллеги [10] изучали активные методы водяного охлаждения лицевой, задней и двойной поверхности для фотоэлектрических модулей. Команда исследовала фотоэлектрические модули мощностью 50 Вт, фотоэлектрический модуль установлен на неподвижном стенде под углом 17°C и в климатических условиях Средиземноморья в городе Сплит, Хорватия. В ходе эксперимента авторы использовали воду из трубопровода для получения водяного фонтана со средним давлением 4,8 бар со скоростью разбрызгивания от 144 л/ч до 225 л/ч. Результаты исследований показывают, что электрический КПД линейно возрастает при увеличении потока воды, распыляемой на поверхность фотоэлектрического модуля. Для случая охлаждения двойных сторон фотоэлектрического модуля соответствующее увеличение выходной мощности составляет 16,3% и 7,7%, если принять во внимание среднюю эквивалентную потерю мощности из-за системы циркуляции воды. В случае переднего охлаждения выходная мощность увеличилась на 14,6% (6,0%) соответственно. В случае охлаждения на задней стороне увеличение выходной мощности соответствует 14,0% (5,4%). Авторы также отметили, что средняя температура фотоэлектрического модуля снизилась с 52°C до 24°C при использовании системы с водяным охлаждением двойной поверхности; самая низкая температура

модуля может быть ограничена из-за постоянной температуры воды в трубопроводе около 17 °С.



Рис. 10. Двусторонняя система охлаждения для фотоэлектрического модуля [10]

III. Вывод

Анализ предполагает возможность улучшения характеристик фотоэлектрических модулей за счет использования водяного охлаждения, которое очень актуально для Вьетнама и других стран с тропическим климатом. В то же время важным вопросом является выбор эффективного метода охлаждения и создание системы автоматического управления температурой фотоэлектрических модулей при построении фотоэлектрических станций различной мощности.

Литература:

1. Benato A., Stoppato A. An Experimental Investigation of a Novel Low-Cost Photovoltaic Panel Active Cooling System // Energies. 2019. vol 12.8. pp. 14-48.

2. Krauter S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels // Solar energy materials and solar cells. 2004. vol. 82.1-2. pp. 131-137.
 3. Odeh S., Behnia M.. Improving photovoltaic module efficiency using water cooling // Heat Transfer Engineering. 2009. vol. 30.6. pp. 499-505.
 4. Dorobanțu L., Popescu M.O. Increasing the efficiency of photovoltaic panels through cooling water film // UPB Sci. Bull.. Series C. 2013. vol. 75.4. pp. 223-232.
 5. Moharram K. A., Abd-Elhady M. S., Kandil H. A., El-Sherif H. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling // Ain Shams Engineering Journal. 2013. vol. 4.4. pp. 869-877.
 6. Irwan Y. M., Leow W. Z., Irwanto M., Amelia A. R., Gomesh N., Safwati I. Indoor test performance of pv panel through water cooling method // Energy Procedia. 2015. vol. 79. pp. 604-611.
 7. Zilli B.M., Lenz A.M., de Souza S.N.M., Secco D., Nogueira C.E.C., Junior O.H.A., Nadalite W.C., Siqueira J.A.C., Gurgacz F. Performance and effect of water-cooling on a microgeneration system of photovoltaic solar energy in Paraná, Brazil // Journal of Cleaner Production. 2018. vol. 192. pp. 477-485.
 8. Bahaidarah H., Subhan A., Gandhidasan P., Rehman S. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions // Energy. 2013. vol. 59. pp 445-453.
 9. Hachicha A.A., Ghenai C., Hamid A.K. Int. J. Energy Power Eng. 2015. vol. 9.9. pp 1106-1109.
 10. Nižetić, Sandro, Čoko D., Yadav A., Grubišić-Čabo F. Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response // Energy conversion and management. 2016. vol. 108. pp 287-296.
-