EVA QATLAMI QALINLIGI O‘ZGARTIRILGAN SUV BILAN SOVITILADIGAN FOTOELEKTRIK MINI-MODULLARNI TAJRIBAVIY TAQQOSLASH

t.f.d., professor. **Sadullayev N.N,**
Buxoro davlat texnika universiteti
Dots. **Nematov Sh.N**
Buxoro davlat texnika universiteti
Soliyeva Z.N
Buxoro davlat texnika universiteti tayanch doktoranti
e-mail: soliyevazamira839@gmail.com

Qabul qilindi: 10.10.2026
Ko‘rib chiqildi: 11.10.2026
Tasdiqlandi: 12.10.2026

Kalit so‘zlar:
fotoelektrik modul, EVA qatlami, suvli sovitish, PV/T qurilma, qisqa tutashuv toki, issiq iqlim.

Ключевые слова:
фотоэлектрический модуль, слой EVA, водяное охлаждение, PV/T установка, ток короткого замыкания, жаркий климат.

Keywords:
photovoltaic module, EVA layer, water cooling, PV/T system, short-circuit current, hot climate.

Annotatsiya. Maqolada ustki va ostki EVA qatlamlari qalinligi 0,5 mm dan 0,2 mm gacha kamaytirilgan monokristall kremniyli mini-modulni standart mini-modul bilan Buxoro yozi sharoitida qiyosiy sinash natijalari keltirilgan. Ikkala modulning orqa tomoniga suv to‘ldirilgan izolyatsiyalangan idish biriktirilgan. 480–920 W/m² nurlanishda salt yurish kuchlanishi va qisqa tutashuv toki asosida hisoblangan shartli quvvat ko‘rsatkichi takomillashgan modulda barcha o‘lchovlarda 2,2–4,8 % ga (o‘rtacha 3,9 %) yuqori bo‘ldi, modullar sirtining harorati orasida esa tizimli farq kuzatilmadi. Natijalar EVA qatlami qalinligini optimallashtirish suvli sovitiladigan PV/T qurilmalar uchun istiqbolli yo‘nalish ekanini ko‘rsatadi.

Аннотация. В статье приведены результаты сравнительных испытаний в летних условиях Бухары монокристаллического мини-модуля, у которого толщина верхнего и нижнего слоёв EVA уменьшена с 0,5 до 0,2 мм, и стандартного мини-модуля. К тыльной стороне обоих модулей прикреплена теплоизолированная ёмкость с водой. При облучённости 480–920 Вт/м² условный показатель мощности, рассчитанный по напряжению холостого хода и току короткого замыкания, у модифицированного модуля во всех измерениях был выше на 2,2–4,8 % (в среднем на 3,9 %), тогда как систематической разницы температур поверхности модулей не

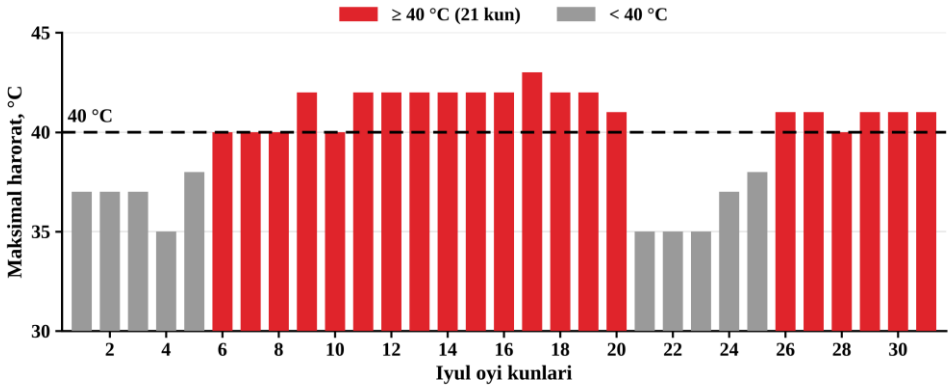
наблюдалось. Результаты показывают, что оптимизация толщины слоя EVA является перспективным направлением для PV/T установок с водяным охлаждением.

Abstract. The paper reports a side-by-side test, under the summer conditions of Bukhara, of a monocrystalline silicon mini-module whose front and rear EVA layers were thinned from 0.5 mm to 0.2 mm and a standard mini-module. An insulated water-filled container was attached to the rear of both modules. At an irradiance of 480–920 W/m², the conditional power indicator calculated from the open-circuit voltage and short-circuit current of the modified module was 2.2–4.8 % (on average 3.9 %) higher in all measurements, while no systematic difference in the surface temperatures of the modules was observed. The results indicate that optimising the EVA layer thickness is a promising direction for water-cooled PV/T systems.

Kirish

Qazib olinadigan yoqilg‘ilardan foydalanish bilan bog‘liq ekologik muammolar va energiya xavfsizligi masalalari dunyo mamlakatlarini qayta tiklanuvchi energiya manbalariga jadal o‘tishga undamoqda [1]. Ayni paytda issiqxona gazlari konsentratsiyasining ortishi bilan jazirama davrlar tez-tez takrorlanmoqda va uzoqroq davom etmoqda. Bu tendensiya O‘zbekistonda, xususan, Buxoro viloyatida ham yaqqol seziladi.

1-rasmda Buxoro shahri uchun 2026-yil iyul oyidagi kunlik maksimal havo harorati keltirilgan [2]. Oyning 21 kunida harorat 40 °C va undan yuqori bo‘lgan, eng yuqori qiymat esa 43 °C ga yetgan. Bunday sharoitda fotoelektrik (PV) modullar kuchli qiziydi va ularning elektr ko‘rsatkichlari pasayadi. Elektr va issiqlik energiyasini bitta yuzadan birgalikda oluvchi fotoelektrotermik (PV/T) qurilmalar bu muammoning ixcham yechimi sifatida e’tirof etilmoqda [3, 4].



1-rasm. Buxoroda 2026-yil iyul oyidagi kunlik maksimal havo harorati [2]

Adabiyotlar tahlili

PV modullarni suv bilan sovitishning turli konstruktiv yechimlari faol o‘rganilmoqda. Habchi va boshqalar [5] panel orqasiga parallel suv quvurlari mahkamlangan sodda gibrid tizimni sinab, sovitilgan panelning elektr samaradorligi sovitilmaganiga nisbatan taxminan 10 % ga yuqori bo‘lishini va ajralgan issiqlik turar-joy issiq suv ta’minoti uchun yaroqli ekanini ko‘rsatgan. Rasool va Abdullah [6] panel orqa tomoniga suvli kamera o‘rnatilganda ish harorati 61 °C dan 39,98 °C gacha pasayganini hamda suv sarfi oshgan sari elektr va issiqlik samaradorligi ortishini aniqlagan.

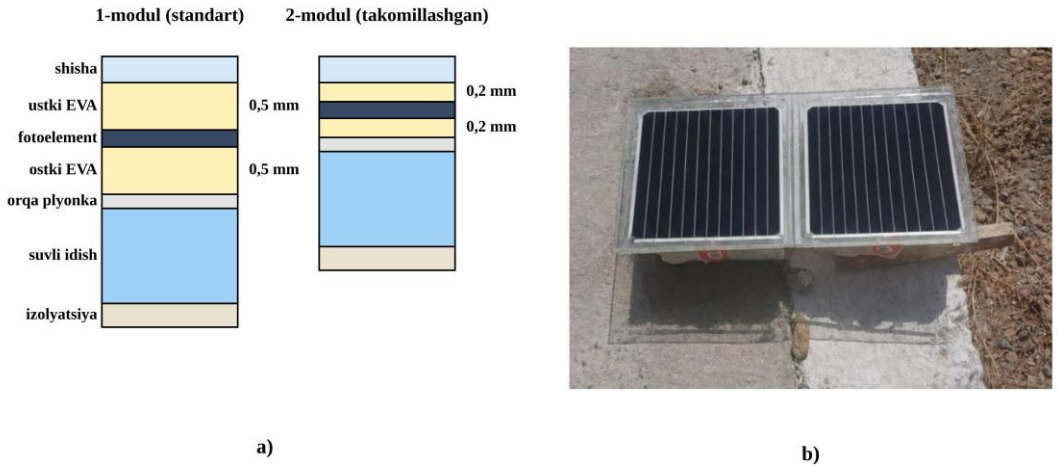
Terashima va boshqalar [7] binoga integratsiyalanadigan tizimlar uchun CIS fotoelektrik modul va yassi alyuminiy quvurli issiqlik almashtirgich bitta korpusga joylashtirilgan PV/T panelni ishlab chiqib, uni maishiy issiq suv ta’minoti hamda xonalarni isitish va sovitish ehtiyojlarini qoplashga mo‘ljallashgan. Bady va boshqalar [4] esa sovitish samaradorligini zanjirsimon joylashtirilgan yarim doira qovurg‘alar yordamida oshirishni taklif etgan.

Ko‘rib chiqilgan ishlarda asosan sovitgichning tuzilishi takomillashtiriladi, modulning ichki qatlamlari esa standart holicha qoladi. Holbuki, mikrokanalli sovitgich bilan jihozlangan quyosh elementi uchun bajarilgan sonli tadqiqotda [8] ostki EVA qatlamini yupqalashtirish jadal sovitishda element haroratini sezilarli kamaytirishi ko‘rsatilgan. Shundan kelib chiqib, mazkur ishda EVA qatlamlari yupqalashtirilgan mini-modulni suvli sovitish sharoitida standart modul bilan bir vaqtda sinash va ularning elektr ko‘rsatkichlarini qiyosiy baholash maqsad qilib qo‘yildi.

Tadqiqot materiallari va usullari

Sinov uchun yuzasi bir xil bo‘lgan ikkita bir elementli monokristall kremniyli mini-modul tayyorlandi (2-rasm). 1-modul standart texnologiya bo‘yicha — fotoelementning har ikki tomoniga 0,5 mm qalinlikdagi EVA plyonkasi bilan, 2-modul esa ustki va ostki EVA qatlamlari 0,2 mm gacha yupqalashtirilgan holda laminatsiyalandi. Har bir modulning orqasiga suv bilan to‘ldirilgan germetik idish biriktirildi va issiqlik yo‘qotilishini kamaytirish uchun idishlar tashqi tomondan

izolyatsiyalandi. Modullar yonma-yon, janubga qaratilib, gorizontga nisbatan 39° burchak ostida o‘rnatildi.



2-rasm. Sinov qurilmasi: a) modullarning qatlamlar tuzilishi (masshtabsiz); b) umumiy ko‘rinishi

Sinovlar iyul oyida, havo harorati 38 °C atrofida bo‘lgan kunda soat 13:25 dan 16:25 gacha har soatda o‘tkazildi. Har bir o‘lchashda modullarning salt yurish kuchlanishi U_{xx} va qisqa tutashuv toki I_{qt} raqamli multimetr bilan, quyosh nurlanishi zichligi G piranometr bilan, shuningdek modullar sirtining harorati qayd etildi. O‘lchov natijalari ma’lumotlarni yig‘ish tizimi orqali kompyuterga uzatilib, qayta ishlandi.

Multimetr bilan o‘lchanadigan U_{xx} va I_{qt} modulning ish nuqtasidagi quvvatini bevosita bermaydi: maksimal quvvat ularning ko‘paytmasidan to‘ldirish koeffitsienti FF marta kichik bo‘ladi:

$$P_{max} = FF \cdot U_{xx} \cdot I_{qt} \quad (1)$$

Shu sababli modullarni taqqoslashda shartli quvvat ko‘rsatkichi va 2-modulning nisbiy ustunligidan foydalanildi:

$$P^* = U_{xx} \cdot I_{qt}, \quad \zeta = \frac{P_2^* - P_1^*}{P_1^*} \cdot 100\ \% \quad (2)$$

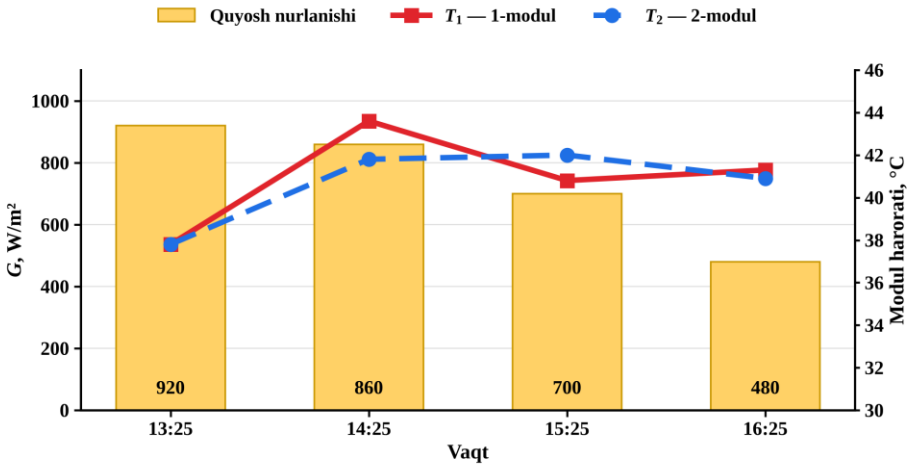
Ikkala modul bir turdagi fotoelementlardan tayyorlangani va bir xil sharoitda sinalgani uchun ularning to‘ldirish koeffitsientlari yaqin deb qabul qilinadi; bu holda ζ maksimal quvvatlarning nisbiy farqiga teng bo‘ladi. Tok va kuchlanish bo‘yicha nisbiy farqlar ΔI_{qt} va ΔU_{xx} ham xuddi shu tarzda hisoblandi. Modul tekisligiga tushayotgan quyosh energiyasining quvvati va elektr samaradorlik quyidagicha aniqlanadi:

$$P_{sol} = G \cdot A, \quad \eta_{el} = \frac{P_{max}}{P_{sol}} \quad (3)$$

bu yerda A — modulning yorug‘lik qabul qiluvchi yuzasi, m².

Natijalar va muhokama

3-rasmda sinov davomida quyosh nurlanishi va modullar haroratining o‘zgarishi keltirilgan. Nurlanish 13:25 dagi 920 W/m² dan 16:25 da 480 W/m² gacha, ya’ni qariyb ikki baravar kamaygan. Modullar harorati 37,8–43,6 °C oralig‘ida bo‘lib, o‘rtacha qiymati 1-modulda 40,9 °C, 2-modulda 40,6 °C ni tashkil etdi. Ular orasidagi farq turli vaqtda turli ishorali bo‘lgan (−1,8…+1,2 °C), ya’ni tizimli xarakterga ega emas.



3-rasm. Sinov davomida quyosh nurlanishi zichligi va modullar sirti haroratining o‘zgarishi

Elektr o‘lchovlar natijalari va ular asosida hisoblangan ko‘rsatkichlar 1-jadvalda jamlangan.

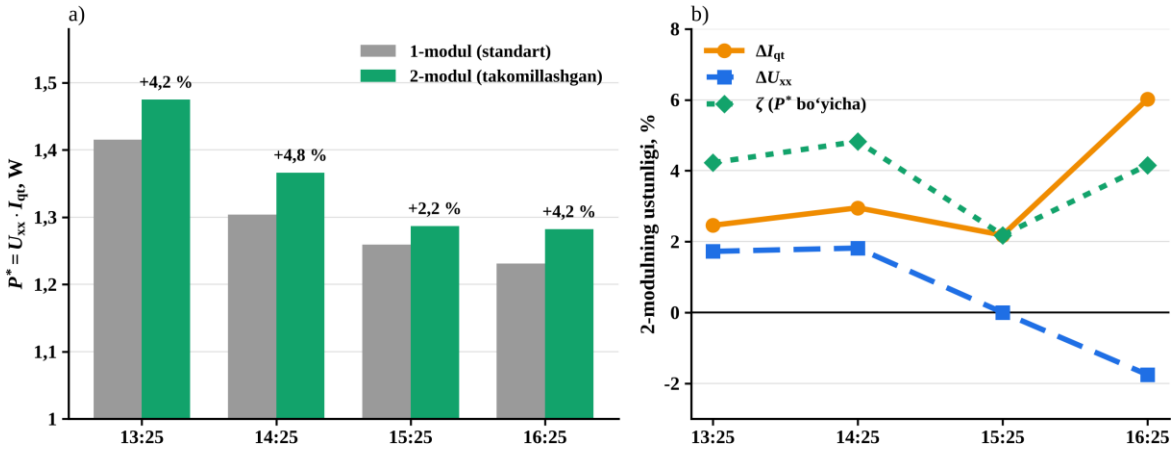
1-jadval

Mini-modullarni qiyosiy sinash natijalari

Ko‘rsatkich	13:25	14:25	15:25	16:25
Quyosh nurlanishi G, W/m²	920	860	700	480
1-modul harorati T_1, °C	37,8	43,6	40,8	41,3
2-modul harorati T_2, °C	37,8	41,8	42,0	40,9
U_{xx1} / U_{xx2}, V	0,58 / 0,59	0,55 / 0,56	0,55 / 0,55	0,57 / 0,56
I_{qt1} / I_{qt2}, A	2,44 / 2,50	2,37 / 2,44	2,29 / 2,34	2,16 / 2,29
P_1^*, W	1,415	1,304	1,260	1,231
P_2^*, W	1,475	1,366	1,287	1,282
Nisbiy ustunlik ζ, %	+4,2	+4,8	+2,2	+4,2

1-jadval va 4-rasmdan ko‘rinadiki, 2-modulning shartli quvvat ko‘rsatkichi to‘rtala o‘lchovda ham 1-modulnikidan yuqori bo‘lib, ustunlik 2,2–4,8 % ni, o‘rtacha 3,9 % ni tashkil etdi. Bu ustunlikning manbaini aniqlash uchun tok va kuchlanish farqlari alohida tahlil qilindi (4-rasm, b). Salt yurish kuchlanishlari orasidagi tafovut ±10 mV dan oshmadi, bu esa multimetrning 0,01 V lik o‘lchov

qadamiga teng. 2-modulning qisqa tutashuv toki esa har bir o‘lchovda 2,2–6,0 % ga katta bo‘ldi.



4-rasm. Mini-modullarning elektr ko‘rsatkichlari: a) shartli quvvat P*; b) 2-modulning tok, kuchlanish va P* bo‘yicha nisbiy ustunligi

Kremniyli fotoelementda harorat ko‘proq kuchlanishni, nurlanish va optik o‘tkazuvchanlik esa ko‘proq tokni belgilaydi [9]. Modullar harorati deyarli bir xil bo‘lgani va farq tok hisobiga yuzaga kelgani sababli 2-modul ustunligining asosiy qismi optik omil — yupqaroq ustki EVA qatlamida yorug‘likning kamroq yutilishi — yoki fotoelementlar parametrlaridagi tabiiy tafovut bilan bog‘liq deb baholanadi. Orqa tomondan sovitishda ostki EVA yupqaligining issiqlik afzalligi esa sovitgich bilan zich issiqlik kontakti ta’minlanganda kuchliroq namoyon bo‘ladi [8].

Shuni ham hisobga olish kerakki, nurlanish 48 % ga kamaygan holda o‘lchangan tok bor-yo‘g‘i 11,5 % ga (2,44 A dan 2,16 A gacha) pasaygan. Bu holat multimetr qayd etgan tok o‘lchov zanjirining qarshiligi bilan cheklanganidan yoki piranometr modul tekisligiga parallel o‘rnatilmaganidan dalolat berishi mumkin. Shu bois olingan qiymatlar modullarni o‘zaro solishtirish uchun ishlatildi, absolyut elektr samaradorlik esa (3) ifoda bo‘yicha volt-amper xarakteristikalari o‘lchangandan so‘ng aniqlanadi. Kelgusi bosqichda modul tekisligidagi piranometr va volt-amper xarakteristikasini yozib oluvchi o‘lchagich yordamida, idishdagi suvning qizishini ham o‘lchagan holda, sinovlarni davom ettirish rejalashtirilgan.

Xulosa

1. Buxoroda 2026-yil iyul oyining 21 kunida havo harorati 40 °C dan yuqori bo‘lgan; bunday iqlimda PV modullarni sovitish va ajralgan issiqlikdan issiq suv ta’minotida foydalanish dolzarb vazifa hisoblanadi.

2. Ustki va ostki EVA qatlamlari 0,2 mm gacha yupqalashtirilgan va orqa tomoniga suvli idish biriktirilgan mini-modulning shartli quvvat ko‘rsatkichi standart modulnikidan barcha o‘lchovlarda 2,2–4,8 % ga (o‘rtacha 3,9 %) yuqori bo‘ldi.

3. Ustunlik asosan qisqa tutashuv toki hisobiga (2,2–6,0 %) yuzaga keldi, modullar harorati orasida esa tizimli farq kuzatilmadi; bu EVA qalinligining optik va issiqlik ta'sirlarini alohida baholash zarurligini ko'rsatadi.

4. Taklif etilgan sodda konstruksiya EVA qatlami qalinligini optimallashtirish orqali suvli sovitiladigan PV/T qurilmalarning elektr ko'rsatkichlarini yaxshilash imkonini beradi va to'liq o'lchamli modulda sinash uchun asos bo'ladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Sadullaev N., Nematov Sh., Soliyeva Z., Nematova Z. A review of the prospects for implementing cooling technologies in the efficient use of photovoltaic modules in the climatic conditions of the Republic of Uzbekistan // AIP Conference Proceedings. – 2025. – Vol. 3331. – P. 050016. – DOI: 10.1063/5.0305902.
2. MSN Weather. Bukhara, Uzbekistan: weather records, July 2026. – URL: https://www.msn.com/en-xl/weather/records
3. Al Baraa Tarnini, Serter Atabay, Mehmet Fatih Orhan. Hybrid solar technologies: A critical review of PV/T systems, cooling methods, and performance trends// Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2026. – Art. 116827. – DOI: 10.1016/j.rser.2026.116827.
4. Bady M., Attia M.E.H., Tlili I., Khelifa A. Boosting solar PV/T efficiency with innovative chain-configured semicircular fins: A high-performance cooling solution // Case Studies in Thermal Engineering. – 2026. – Vol. 81. – P. 108004. – DOI: 10.1016/j.csite.2026.108004.
5. Habchi C., Bou-Mosleh C., Khaled M. An experimental analysis of a hybrid photovoltaic thermal system through parallel water pipe integration // International Journal of Thermofluids. – 2024. – Vol. 21. – P. 100538. – DOI: 10.1016/j.ijft.2023.100538.
6. Rasool I.N., Abdullah R.S. Experimental study of PV panel performance using backside water cooling chamber // International Journal of Energy Production and Management. – 2023. – Vol. 8, № 2. – P. 89–95. – DOI: 10.18280/ijepm.080205.
7. Terashima K., Sato H., Ikaga T. PV/T solar panel for supplying residential demands of heating/cooling and hot water with a lower environmental thermal load // Energy and Buildings. – 2023. – Vol. 297. – P. 113408. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113408.
8. Harb A.E.-M.A., Radwan A., Elsayed K., Sedrak M., Ahmed M. Influence of varying the Ethylene-Vinyl Acetate layer thicknesses on the performance of a polycrystalline silicon solar cell integrated with a microchannel heat sink // Solar Energy. – 2020. – Vol. 195. – P. 592–609.
9. Skoplaki E., Palyvos J.A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations // Solar Energy. – 2009. – Vol. 83, № 5. – P. 614–624.