

**FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI HUZURIDAGI TEXNIKA  
FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI ILMIY DARAJASINI  
BERUVCHI PhD. 03/27.02.2020.T.106.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI**

**MIRZAALIMOV NAVRUZBEK ALISHER O‘G‘LI**

**KREMNIY QUYOSH ELEMENTLARI ASOSIDA 3D FORMATLI  
FOTOELEKTRIK MODULLARNI ISHLAB CHIQISH**

**05.05.06 – Qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari**

**TEXNIKA FANLARI bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Farg‘ona – 2023**

**Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)  
dissertatsiya avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)  
по техническим наукам**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)  
on technical sciences**

<b>Mirzaalimov Navruzbek Alisher o‘g‘li</b> Kremniy quyosh elementlari asosida 3D formatli fotoelektrik modullarini ishlab chiqish .....	3
<b>Мирзаалимов Наврузбек Алишер угли</b> Разработка фотоэлектрических модулей 3D формата с кремниевыми солнечными элементами.....	29
<b>Mirzaalimov Navruzbek Alisher o‘g‘li</b> Development of photoelectric modules in 3D format with silicon solar cells...	57
<b>E‘lon qilingan ishlar ro‘yhati</b> Список опубликованных работ List of published works .....	60

**FARG‘ONA POLITEXNIKA INSTITUTI HUZURIDAGI TEXNIKA  
FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI ILMIY DARAJASINI  
BERUVCHI PhD.03/27.02.2020.T.106.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI**

**MIRZAALIMOV NAVRUZBEK ALISHER O‘G‘LI**

**KREMNIY QUYOSH ELEMENTLARI ASOSIDA 3D FORMATLI  
FOTOELEKTRIK MODULLARNI ISHLAB CHIQISH**

**05.05.06 – Qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari**

**TEXNIKA FANLARI bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
AVTOREFERATI**

**Farg‘ona – 2023**

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar maxkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida № B2022.4.PhD/T3329 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Andijon davlat universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-saxifasida ([www.ferpi.uz](http://www.ferpi.uz)) va "ZiyoNet" Axborot ta'lim portalida ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:** Aliyev Rayimjon Usmonovich  
texnika fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:** Mamadaliyeva Lola Kamildjanovna  
texnika fanlari doktori, professor  
Yuldashev Isroiljon Abriyevich  
texnika fanlari doktori, professor

**Yetakchi tashkilot:** Qarshi davlat universiteti

Dissertatsiya himoyasi Farg'ona politexnika instituti huzuridagi PhD.03/27.02.2020.T.106.02 raqamli Ilmiy kengashning 2023 yil "29" dekabr soat 14.00 dagi majlisida bo'lib o'tadi. Manzil: 150107, Farg'ona sh. 86 uy. Tel: (+99873)241-12-06, faks (+99873)241-12-06, e-mail: [ilmiy-kengash@farpi.uz](mailto:ilmiy-kengash@farpi.uz), kichik majlislar zali.

Dissertatsiya bilan Farg'ona politexnika institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№ 199 raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 150107, Farg'ona sh. Farg'ona k. 86 uy. Farg'ona politexnika instituti. Tel: (+99873)241-12-06.

Dissertatsiya avtoreferati 2023 yil "14" dekabr kuni tarqatildi.  
(2023 yil "14" dekabr dagi № 4 raqamli restr bayonnomasi)



**S.F.Ergashev**  
Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash  
raisi, t.f.d., professor

**B.A.Abdukarimov**  
Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash  
ilmiy kotibi, PhD., dotsent

**A.A.Kuchkarov**  
Ilmiy daraja beruvchi ilmiy kengash  
qoshidagi ilmiy seminar raisi,  
PhD., dotsent

## **KIRISH (faslafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi.** Jahonda bugungi kunda elektr energiya manbalariga bo'lgan talabning doimiy o'sishi va global ekologik muammolarning keskinlashishi qayta tiklanuvchi energiya manbalarini jadal qo'llashni kengaytirishni talab etmoqda. Qayta tiklanadigan energiya manbalarining (QTEM) eng ekologik toza va istiqbolli turi yarimo'tkazgichli fotoelektrik quyosh elementlari (QE) orqali olingan quyosh energiyasini fotoelektrik konvertatsiya qilishdir. Qayta tiklanuvchi energiya manbalari hisoblangan yarimo'tkazgichli fotoelektrik energiya o'zgartirgichlarning samaradorligini oshirish, quyosh elementlari yuzasiga tushayotgan yorug'lik oqimining samarali yutilishini ta'minlash, quyosh nurlari bilan yoritilganda ularning sirti qizib ketishining oldini olish, yuqori samarali fotoelektrik energetik qurilmalarning texnik jihatdan optimal konstruksiyalarini ishlab chiqish, ularning fotoelektrik xossalari modellashtirish asosida ishlash samaradorligini oshirish hamda fotoelektrik energiya qurilmalardan foydalanishning o'ziga xos imkoniyatlarini tadqiq etish muhim ahamiyatga ega hisoblanadi.

Jahonda fotoelektrik energetik qurilmalarni issiq iqlimga moslashtirilgan konstruksiyalarni takomillashtirish, xususan quyosh elementiga yorug'lik intensivligi, temperatura ta'sirini o'rganish, ayniqsa konsentrlangan quyosh nurlari bilan yoritilganda ularning sirti qizib ketishi tufayli fotoelektrik energetik qurilmalarning samaradorligini tushib ketishining oldini olishga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada, jumladan o'z o'qi atrofida aylanish orqali o'zini sovuta oladigan turli shakldagi fotoelektrik qurilmalarni samaradorligini oshirish va ularning asosiy parametrlarini optimallashtirish, quyosh elementlarining shakli o'zgarishiga fotoelektrik parametrlari material turiga bog'liq ravishda o'zgarishini modellashtirish bo'yicha tadqiqotlar ustuvor hisoblanmoqda. Shu bilan birga, prizma va piramida shakldagi fotoelektrik qurilmalarni yasashda foydalanish uchun turli shakldagi mono- va polikristall kremniy asosli quyosh elementlarini elektrofizik parametrlarini modellashtirish, ish rejimlari xususiyatlarini optimallashtirish, temperatura ortganda quyosh elementlarining foydali ish koeffitsienti kamayishini oldini olish, quyosh elementlaridan sovutish tizimiga ega fotoelektrik qurilmalarni yasash va loyihalash dolzarb vazifalardan hisoblanmoqda.

Respublikamizda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan keng foydalanish va samaradorligini oshirishga yordam beradigan yangi texnologiyalarni yaratish bo'yicha tadqiqotlar o'tkazish va ularni amalda qo'llash yuzasidan keng qamrovli chora-tadbirlar amalga oshirib, muayyan natijalarga erishilmoqda. 2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan «Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta'minlash hamda "Yashil iqtisodiyot" texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish»<sup>1</sup> bo'yicha muhim vazifalari belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, jumladan, qayta tiklanuvchi energiya

---

<sup>1</sup> O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni, 28.01.2022 yildagi PF-60-son

manbalari asosida yangi fotoelektrik energetik qurilmalarni issiq iqlimga moslashtirilgan konstruksiyalarni ishlab chiqish, mavjudlarini modernizatsiya qilish, jumladan, kremniy quyosh elementlari asosida fotoelektrik modullardan foydalanishda, ularning energetik samaradorligini oshirishga qaratilgan ilmiy-texnik yechimlarni aniqlash muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF- 60-son «2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida»gi Farmoni, 2020 yil 10 iyuldagi PQ-4779-son «Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg‘i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida»<sup>2</sup>, 2021 yil 9 apreldagi PQ-5063-son «O‘zbekiston Respublikasida qayta tiklanuvchi va vodorod energetikasini rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida» 2018 yil 17 iyuldagi PQ-3855-sonli “Ilmiy va ilmiy-texnikaviy faoliyat natijalarini tijoratlashtirish samaradorligini oshirish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi<sup>3</sup>, 2018 yil 6 avgustdagi PQ-3899-sonli “Ilmiy va innovatsion faoliyatni integratsiyalash tizimining samaradorligini oshirish bo‘yicha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi, 2021 yil 19 martdagi PQ-5032-sonli “Fizika sohasidagi ta‘lim sifatini oshirish va ilmiy tadqiqotlarni rivojlantirish choratadbirlari to‘g‘risida”gi qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning O‘zbekiston Respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining ustivor yo‘nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot O‘zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarining IV. “Qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanish usullarini ishlab chiqish, nanotexnologiyalar, fotonika va boshqa ilg‘or texnologiyalar asosida texnika va qurilmalarni yaratish” ustivor yo‘nalishiga mos keladi.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Kremniy asosidagi fotoelektrik energetik qurilmalar, yuqori samarador fotoelektrik energiya o‘zgartirgichlar va kremniy asosida quyosh elementlarini ishlab chiqish bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar jahonning ilg‘or mamlakatlari ilmiy tadqiqot markazlarida va universitetlarida olib borilmoqda. Xususan, xorij va hamdo‘stlik mamlakatlari olimlaridan Daniel S. Clark, D. Gregory, Christoph Karl La Due (AQSh), Syu-u OZEKI, Mito-shi, Yuji HAMACHI (Yaponiya), E.Skoplaki, J.A.Palyvos (Gresiya), V.A.Grlixes, V.A.Mayorov, S.N.Trushevskiy, D.S.Strebkov (Rossiya), Serj Abraken, Defiz Jan-Marko, Kolett Jan-Pol (Fransiya), A.Farenbrux, R.Byuba (Germaniya) va boshqa bir qator tadqiqotchilar tomonidan ilmiy va amaliy nuqtai nazardan yarimo‘tkazgichli  $p-n$  tuzilmalarning turli fotoelektrik modullarni konstruksiyalash asosida energiyaning fotoelektrik o‘zgartirgich samaradorligini oshirish bo‘yicha izlanishlar olib borilmoqda.

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi akademiklari M.S.Saidov, R.A.Mo‘minov va M.S.Bahodirxonov, professorlar M.N.Tursunov, N.R.Avezova, R.Aliyev va boshqa o‘zbek olimlari tomonidan kremniy asosidagi yuqori samarador

<sup>2</sup> O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori, 10.07.2020 yildagi PQ-4779-son

<sup>3</sup> O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining Qarori, 14.07.2018 yildagi PQ-3855-son

fotoelektrik energiya o'zgartirgichlar ishlab chiqish va fotoelektrik xususiyatlari va ularga harorat va yorug'lik intensivligi o'zgarishlarining ta'sirlari keng ko'lamda o'rganilgan. Professorlar A.Mirzaboyev, N.Matchanov va B.M.Abduraxmonovlar tomonidan "Smart Grid" kabi zamonaviy avtomatlashtirilgan tizimlarga ega quyosh fotoelektrik energetik qurilmalar (QFEQ) yaratishning yangi texnik va texnologik afzalliklari ishlab chiqilgan.

Mazkur tadqiqotlar natijasida kremniy quyosh elementlari asosidagi fotoelektrik modullarni ishlab chiqish va tadqiq etishda erishilgan ijobiy natijalarga qaramasdan, texnik-iqtisodiy harajatlarni hisobga olgan holda, monokristall va polikristall kremniy quyosh elementlari asosida 3D formatli fotoelektrik modullar va energetik qurilmalarni yaratish vazifalari yetarli darajada o'rganilmagan.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya ishi Andijon davlat universiteti Fizika kafedrasining 2017-2022 yillarda "Mono- va polikristall asosli quyosh elementlarini raqamli modellashtirish va eksperimental ishlab chiqish imkoniyatlarini, shuningdek, konsentrlangan quyosh nurlarini o'zgartirish uchun gibridd elektr stansiyalarini amaliy tadqiq etish" ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga muvofiq bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** kremniyli quyosh elementlari asosida 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmani raqamli modellashtirish va tajriba usullari bilan ishlab chiqishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

- turli shakldagi kremniyli quyosh elementlari asosida piramida va prizma shaklidagi konstruksiyasiga ega 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmaning raqamli modelini ishlab chiqish va ilmiy asoslash;

- kremniyli quyosh elementlari asosida piramida va prizma shaklidagi konstruksiyali 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmaning dinamik va fotoelektrik xarakteristikalarini aniqlash;

- 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmani amaliy (eksperimental) ishlab chiqish va patentlash;

- kremniyli quyosh elementlari asosida 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmani ishlab chiqish usullarini o'zlashtirish va xarakteristikalarini o'lchash;

- kremniyli quyosh elementlari asosida piramida va prizma shaklidagi 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmalar tajriba na'munalarini ishlab chiqish, sinovdan o'tkazish va amalga oshirish, shuningdek ularning texnik-iqtisodiy xarakteristikalarini aniqlash.

**Tadqiqotning obyekt**i sifatida raqamli texnologiya asosida modellashtirilgan va eksperimental tarzda yaratilgan kremniyli quyosh elementlari asosidagi 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmalar olingan.

**Tadqiqotning predmet**i 3D formatdagi kremniyli quyosh fotoelektrik energetik qurilmalarining raqamli modellashtirish texnologiyasi va eksperimental ravishda yaratilgan konstruksiyalarning quyosh energiyasini fotoelektrik konvertatsiya qilishning fizik jarayonlari hisoblanadi.

**Tadqiqot usullari** sifatida “Sentaurus TCAD” dasturiy tizimi va “Sinton Instrument WCT-120”, “Sinton Instrument Suns-Voc”, “EDIBON – Photovoltaic. Units with SCADA: EESFC” eksperimental laboratoriya o‘lchov tizimlari asosida raqamli asbob-texnologik modellashtirish usullari, bundan tashqari “STGraphs”, “STTemperature” va “STVertikal” kabi dasturiy mahsulotlaridan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

- piramida shaklidagi konstruksiyaga ega 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmaning konstruksion parametrlarini optimallashtirish va fotoelektrik ko‘rsatkichlarini hisobga olinib raqamli modellashtirish asosida yassi yuzali quyosh paneliga nisbatan samaradorligi 42,5% gacha yuqori bo‘lishi aniqlangan;

- quyosh elementlarining geometrik shakli, ularning samaradorligiga ta’siri, kremniyli plastinalarning perimetrik yon sirlari bo‘ylab fotogeneratsiyalangan nomuvozanat zaryad tashuvchilar rekombinatsion yo‘qotilishlarini inobatga olgan holda, fotoelektrik energetik qurilmalarda foydalanilgan uchburchak shaklidagi monokristall quyosh elementlarining chiqish quvvati 4% gacha ortishi aniqlangan;

- quyosh elementi sirtiga tushayotgan yorug‘lik nuri energiyasi va bu sirtan tarqalayotgan issiqlik nurlanishi energiyasi farqini ta’minlash orqali uning sirt haroratini pasaytirish usuli ishlab chiqilgan;

- piramida shaklidagi konstruksiyaga ega 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmaning vertikal joylashuvini hisobga olgan holda uzluksiz elektr energiya bilan ta’minlash imkonini beruvchi gibrid quyosh-shamol qurilmasini konstruksiyasi ishlab chiqilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

- uzluksiz elektr energiyasi ishlab chiqarish uchun konstruksion parametrlarini optimallashtirish asosida gibrid quyosh-shamol energetik qurilmasi ishlab chiqilgan;

- piramida shaklidagi fotoelektrik energetik qurilmalar uchun uchburchak shaklidagi monokristall quyosh elementlaridan foydalanilganda quvvati jihatdan 4% ga, prizma shaklidagi fotoelektrik energetik qurilmalar uchun to‘rtburchak shaklidagi polikristall quyosh elementlaridan foydalanilganda quvvati jihatdan 10% ga ortishi aniqlangan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi** modellashtirishning zamonaviy raqamli usullarini qo‘llanilganligi, mantiqiy birlikning ta’minlanganligi, zamonaviy kompyuterlashtirilgan o‘lchash qurilmalaridan foydalanilganligi, eksperimental olingan va hisoblangan natijalarning o‘zaro mosligi hamda o‘lchash natijalarini qayta ishlashning umumqabul qilingan usullariga tayanganligi bilan asoslanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati quyosh elementlari geometrik shaklining ularning samaradorligiga ta’siri kremniyli plastinalarning emitter va baza qatlamlarida fotogeneratsiyalanayotgan zaryad tashuvchilar, elektr potentsiali, elektrostatik maydon kuchlanganligining fazoviy taqsimoti, rekombinatsiya tufayli yuzaga keluvchi issiqlik ajralishi, tok zichligi haqidagi bilimlarning chuqurlashishi hamda perimetrik yon sirlari bo‘ylab fotogeneratsiyalangan nomuvozanat zaryad tashuvchilar rekombinatsion yo‘qotishlarining tabiati bilan ilmiy asoslanganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati piramida shaklidagi konstruksiyaga ega 3D formatli fotoelektrik energetik qurilma sifatida “Fotoelektrik modul” nomli yangi konstruksiya ishlab chiqilganligi va tadbir etilganligi bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Kremniy quyosh elementlari asosida 3D formatli fotoelektrik modullarni ishlab chiqish bo‘yicha olingan natijalar asosida:

- kremniyli quyosh elementi asosidagi 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmasi (FAP 01804, 24.01.2022 yil) joriy qilingan («O‘zeltexsanoat»ning 2022 yil 3 iyundagi 04-3/1377-son ma’lumotnomasi). Natijada, ishlab chiqarish sharoitida kremniy asosli quyosh elementlaridan tashkil topgan fotoelektrik energetik qurilmalarni optimallashtirish va ularning samaradorligini oshirish imkonini bergan;

- “Foton” AJda yuzalari teng uchburchak va to‘rtburchak shaklidagi mono- va polikristall kremniy asosli quyosh elementlari joriy etilgan (O‘zeltexsanoat»ning 2022 yil 3 iyundagi 04-3/1377-son ma’lumotnomasi). Natijada, monokristall kremniyli quyosh elementini uchburchak shaklda kesilganda 4% ga, polikristall kremniyli quyosh elementini to‘rtburchak shaklda kesilganda 10 % ga chiqish quvvati yuqori bo‘lishiga erishilgan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 3 ta xalqaro va 4 ta respublika ilmiy anjumanlarida ma’ruza qilingan va muhokama qilingan.

**Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 25 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarni chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 10 maqola jumladan, 6 ta respublika, 4 ta xorijiy (Scopus va Web of Science ma’lumotlar bazasiga kiruvchi) ilmiy jurnallarda nashir etilgan, shuningdek, 1 ta foydali model uchun patent hamda 1 ta dasturiy mahsulot uchun mualliflik guvohnomalari olingan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya tarkibi kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 111 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlariga mosligi ko‘rsatilgan, muammoning o‘rganilganlik darajasi ochib berilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari belgilangan, tadqiqotning ob‘yektlari, tadqiqot usullari, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy ahamiyati, tadqiqot natijalarining joriy qilinishi, ishning aprobatsiyadan o‘tganligi va tuzilishi to‘g‘risida ma‘lumotlar keltirilgan.

**“Kremniy quyosh elementlari asosidagi fotoelektrik modullarning turlari, ishlash tamoyillari va xarakteristikalarini”** deb nomlangan birinchi bobda turli xil fotoelektrik modullarni yig‘ish uchun mo‘ljallangan kremniyli quyosh elementlari haqidagi adabiyot ma‘lumotlari va ularning xarakteristik tahlillari keltirilgan. Fotoelektrik modullarni yaratishning fizik va konstruksiyaviy asoslari bo‘yicha ishlarni ko‘rib chiqish tasvirlangan. Kremniyli quyosh elementlari asosidagi fotoelektrik modullarning ishlash xarakteristikalarini va ekspluatatsion afzalliklari, shuningdek, kremniyli quyosh elementlari va fotoelektrik modullarni modellashtirishning ma‘lum usullari tahlil qilingan.

Quyosh fotoelektrik qurilmasi (QFQ) samaradorligini oshirishning ma‘lum usullari quyidagilardan iborat ekanligi aniqlandi: quyosh fotoelementlari (QFE) narxini pasaytirish va ularning foydali ish koeffitsienti (FIK)ni oshirishga qaratilgan ilg‘or rivojlangan texnologiyalarini ishlab chiqish; quyosh nurlash konsentratorlaridan foydalanish. Issiq iqlim sharoitida kremniyli quyosh elementlari asosidagi fotoelektrik modullarning mo‘tadil ishlashining ilmiy, amaliy va texnik muammolari aniqlandi.

Quyosh fotoelektrik qurilmasi (QFQ)ning ishlash prinsipini modellashtirish bilan bog‘liq bo‘lgan ishning tahliliga ko‘ra, QFQning xarakteristikalariga hisoblash faktorlarini ta‘sirini hisobga olgan holda va chiqish xarakteristikalarini yuqori aniqlikda hisoblashga imkon beruvchi matematik va imitatsion modellar ishlab chiqilishi zarurligi ma‘lum bo‘ldi. Ko‘p tarmoqli raqamli modellashtirish texnologiyalaridan foydalanish istiqbollari ko‘rsatilgan. Yuqorida keltirilgan adabiyotlardagi ma‘lumotlarni tahlil qilish asosida dissertatsiya tadqiqotining kirish qismida maqsad va vazifalari shakllantirilgan.

**“Kremniyli quyosh elementlari asosida 3D formatli fotoelektrik modullarni ishlab chiqishning ilmiy-uslubiy xarakteristikalarini”** deb nomlangan ikkinchi bobda 3D formatli fotoelektrik modul uchun kremniyli quyosh elementlarini (QE) tanlash va ularning xarakteristikalarini aniqlash usullari asoslangan. 3D formatli FMni yig‘ish uchun mo‘ljallangan kremniyli quyosh elementlarining xarakteristikalarini eksperimental tahlil qilish amalga oshirildi. 3D formatli FMni yaratish va ularning xarakteristikalarini aniqlash usullari ilmiy asoslandi.

Taqdim etilgan 3D formatli FM geometrik shakliga qarab, ham to‘rtburchak, ham uchburchak shakldagi QElardan foydalanish mumkin. Monokristall va polikristall asosidagi kremniyli QEni tanlash mumkin bo‘ladi.

Quyosh panelini (QP) yoki quyosh modullarini (QM) yig'ishda ularning ish maydonini (sirtini) eng samarali to'ldirish muhim amaliy vazifalardan biri hisoblanadi. Tabiiyki, agar QP yoki QM to'rtburchak maydonga ega bo'lsa, u holda to'rtburchak shakldagi quyosh elementlarini (QE) ishlatish kerak. Bunday holatdagi an'anaviy to'rtburchak shaklidagi QP ko'pincha sanoatda ishlab chiqariladi. Ushbu ishda huddi shunday holat tadqiqot uchun tayyorlangan QM ining asosiy formatining prizmatik shakldagi 3D formatli QMiga mos keladi.

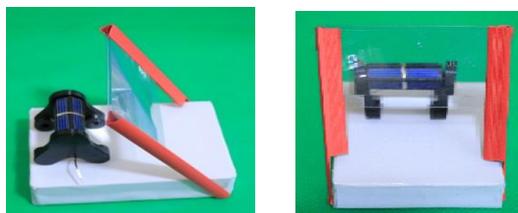
Dissertatsiya tadqiqotida tadqiqot uchun tayyorlangan quyosh modullarining (QM) asosiy formatining piramidal shakliga ega 3D formatli QMlariga alohida e'tibor qaratilgan. QMning bunday konstruksiyalarida ishchi maydonni yanada samarali to'ldirish uchun uchburchakli quyosh elementlari (QE)dan foydalanish zarur. Shuning uchun dissertatsiya tadqiqoti davomida turli shakl va o'lchamdagi QElarni o'rganish bo'yicha vazifalar qo'yildi. Bu muammoni yechish usullari ham kompyuterda modellashtirish, ham eksperimental tarzda xal qilindi.



1-rasm. Piramida shaklidagi va prizmatik arxitekturaga ega 3D formatli quyosh fotoelektrik modullari hamda tekis panelning fotosuratlari



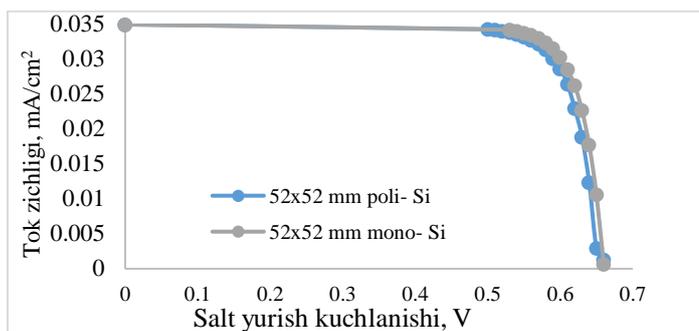
2-rasm. Prizmatik arxitekturaga ega kichik o'lchamdagi 3D formatli quyosh modulining prototipi fotosurati



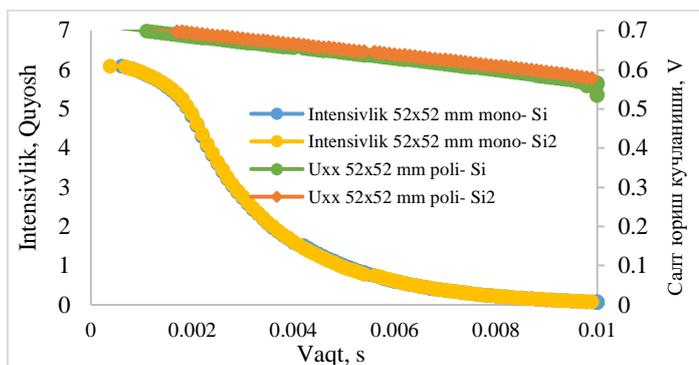
3-rasm. Frenel linzali Prizmatik arxitekturaga ega 3D formatli fotoelektrik modulning mikro-energetik qurilmasi



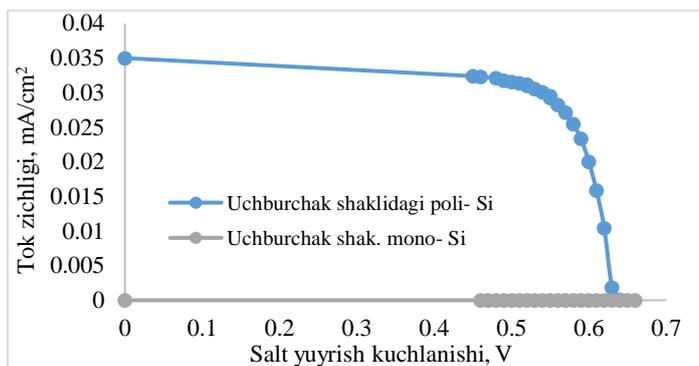
4-rasm. Kremniyli quyosh panellari asosida prizma shaklidagi fotoelektrik modulning sanoat na'munasi fotosurati



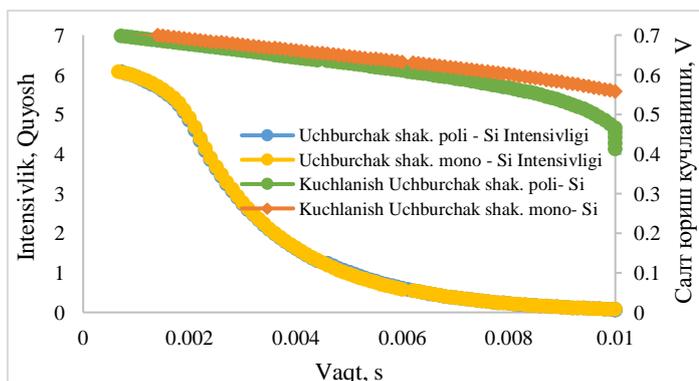
5-rasm. “Sinton Instrument Suns-Voc” qurilmasi yordamida o‘lchangan o‘lchami 52×52 mm<sup>2</sup> bo‘lgan mono- va polikristall kremniyli quyosh elementlarining volt-ampere xarakteristikasi



6-rasm. “Sinton Suns-Voc” qurilmasi yordamida olingan o‘lchamlari 52×52 mm<sup>2</sup> bo‘lgan mono- va polikristall kremniyli quyosh elementlarining salt yurish kuchlanishi va yorug‘lik intensivligini yorug‘lik manbai ekspozitsiya vaqtiga bog‘liq o‘zgarishi



7-rasm. Uchburchak shaklidagi mono- va polikristall kremniyli quyosh elementlarining volt-ampere xarakteristikalari



8-rasm. “Sinton Suns-Voc” qurilmasi yordamida uchburchak shaklidagi mono- va polikristall kremniyli quyosh elementlarining salt yurish kuchlanishi va yorug‘lik intensivligini yorug‘lik manbai ekspozitsiya vaqtiga bog‘liq o‘zgarishi

Dissertatsiyaning “**3D formatli fotoelektrik modullarni modellashtirish va xarakteristikalarini tadqiq qilish usullari**” deb nomlangan uchinchi bobda kremniyli QElari asosidagi 3D formatli fotoelektrik modullarning modellashtirish usullari asoslangan. 3D formatli fotoelektrik modullarning dinamik modelini ishlab chiqish fizikasi ochib berilgan. Raqamli modellarni ishlab chiqish natijalari va piramidal shakldagi Fmlarning xarakteristikalari tahlil qilingan va taqdim etilgan. 3D formatli FMda foydalaniladigan QElarining shakllarini eksperimental va hisoblash tadqiqot ishlari bajarilgan.

Nazariy jihatdan tasavvur qilaylik, quyosh paneliga tushayotgan yorug‘likning quvvati va aylantirilgan elektr energiyasi orasida quyidagicha bog‘lanish mavjud bo‘lsin:

$$P_c = P_{in} - P_{dis} \quad (1)$$

Bu yerda  $P_c$  – aylantirilgan elektr energiyasi quvvati,  $P_{in}$  – quyosh paneliga tushayotgan yorug‘likning quvvati,  $P_{dis}$  – yo‘qotilgan quvvat.

Keltirilgan parametrlarning yorug‘lik intensivligi va temperaturaga bog‘liqligi quyidagicha:

$$P_{in} = I \cdot \alpha \cdot S \quad (2)$$

$$P_{dis} = U_L \cdot (T_c - T_a) \cdot S \quad (3)$$

$$P_c = \eta \cdot I \cdot S \quad (4)$$

Bu yerda  $I$  – yorug‘lik intensivligi,  $S$  – quyosh paneli sirtining yuzasi,  $\eta$  – quyosh paneli FIK,  $U_L$  – issiqlik yo‘qotish koeffitsienti,  $\alpha$  – quyosh panelining nur yutish koeffitsienti.

$$\eta \cdot I \cdot S = I \cdot \alpha \cdot S - U_L \cdot (T_c - T_a) \cdot S \quad (5)$$

$$\eta \cdot I = I \cdot \alpha - U_L \cdot (T_c - T_a) \quad (6)$$

Ifodalardan foydalanib  $T_c$  ni topish mumkin:

$$U_L \cdot (T_c - T_a) = I \cdot (\alpha - \eta) \quad (7)$$

$$T_c - T_a = I / U_L \cdot (\alpha - \eta) \quad (8)$$

$$T_c = T_a + I \cdot \alpha / U_L \cdot (1 - \eta / \alpha) \quad (9)$$

Agar normal sharoitda (NOCT) deb hisoblasak:

$$U_L = \frac{I \cdot (\alpha - \eta)}{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}} = \frac{\alpha \cdot I_{NOCT}}{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}} \quad (10)$$

Demak,  $\eta = 0,21$ ,  $I = 1000 \frac{W}{m^2}$ ,  $\alpha = 0,73$  бўлганда,  $U_L = 26 W/(m^2 \cdot K)$

$$T_c = T_a + I / I_{NOCT} (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) (1 - \eta_c / \alpha) \quad (11)$$

$$T_c = T_a + I_a / I_{NOCT} (U_{L,NOCT} / U_L) (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) (1 - \eta_c / \alpha) \quad (12)$$

Polikristall kremniyli QPlari uchun konveksiya koeffitsienti Skoplaki tomonidan tadqiq qilingan va majburiy konveksiya uchun empirik formula quyidagicha olingan:

$$q_\omega = 5,7 + 3,8 \cdot \vartheta \quad (13)$$

QPining yuzasi va atrof-muhit temperaturasi orasidagi farq vujudga kelsa issiqlik nurlanish tufayli qo‘shimcha energiya almashinuvi jarayoni sodir bo‘ladi:

$$q_{rad} = \delta \cdot \varepsilon \cdot (T_c^4 - T_s^4) \quad (14)$$

yoki

$$q_{rad} = \delta \cdot \varepsilon \cdot (T_c^2 + T_s^2)(T_c + T_s)(T_c - T_s) / (T_c + T_a) \quad (15)$$

Bu yerda,  $T_s$  – osmonning temperaturasi,  $\varepsilon$  – issiqlik yutish koeffitsienti,  $\delta$  – Bolsman doimiysi.

$$q = q_\omega + q_{rad} \quad (16)$$

Agar boshlang'ich holatda  $T_c = T_\alpha$  bo'lsa, u holda  $q = q_\omega$ ,  $U_L = q$  bo'ladi va shunday qilib quyidagi ifodani olish mumkin:

$$T_c = T_a + \left( I \cdot \frac{\alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\eta_c}{\alpha} \right) \quad (17)$$

$$T_c = T_a + \left( \frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\eta_c \cdot T_c}{\alpha} \right) \quad (18)$$

$$\eta \cdot (T_c) = \eta_{ref} (1 - \beta (T_c - T_{ref})) \quad (19)$$

$$T_c = T_a + \left( \frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta} \right) \cdot \left( 1 - \eta_{ref} (1 - \beta (T_c - T_{ref})) / \alpha \right) \quad (20)$$

$$T_c = T_a + \left( \frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\eta_{ref}}{\alpha} + \frac{\eta_{ref} \cdot \beta}{\alpha (T_c - T_{ref})} \right) \quad (21)$$

$$T_c = T_a + \left( \frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\eta_{ref}}{\alpha} + \frac{\eta_{ref} \cdot \beta \cdot T_c}{\alpha} - \frac{\eta_{ref} \cdot \beta \cdot T_{ref}}{\alpha} \right) \quad (22)$$

$$T_c \left( 1 - \left( \frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta} \right) \cdot \left( \frac{\eta_{ref} \cdot \beta}{\alpha} \right) \right) = T_a + \left( \frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\eta_{ref}}{\alpha} \right) - \left( \frac{\eta_{ref} \cdot \beta \cdot T_{ref}}{\alpha} \right) \quad (23)$$

$$T_c = \left( T_a + \left( \frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\eta_{ref}}{\alpha} - \frac{\eta_{ref} \cdot \beta \cdot T_{ref}}{\alpha} \right) \right) / \left( 1 - \left( \frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta} \right) \cdot \left( \frac{\eta_{ref} \cdot \beta}{\alpha} \right) \right) \quad (24)$$

QP sirtining temperaturasi yuqoridagi ifoda orqali aniqlanadi. Bu yerda,  $\eta_{ref}$  - quyosh panelining  $T_{ref}$  temperaturadagi FIK.

Kesik piramida shaklida ishlab chiqilgan tajriba qurilmasi asosiy parametrlarining o'zaro bog'liqligini ko'rib chiqamiz. Elektromotorining kuch momenti qurilmaning aylanishiga olib keladi va havo qarshiligini yengib chiqadi:

$$M_t = M + M_{fr} \quad (25)$$

$$M = I \varepsilon \quad (26)$$

$$dM_{fr} = F_{fr} dr \quad (27)$$

Bu yerda,  $M_t$  – tashqi kuch momenti (elektromotor),  $M$  – harakatlantiruvchi kuch momenti,  $M_{fr}$  – ishqalanish kuchi momenti,  $I$  – inersiya momenti,  $\varepsilon$  – burchak tezlanishi.

Qurilma piramida shaklida bo'lgani uchun turli balandliklarda turlicha havoning ishqalanish kuchi momenti ta'sir qiladi.

Agar qurilma radiusining  $dr$  qismiga  $dM_{fr}$  ishqalanish kuch momenti ta'sir qilsa, umumiy ishqalanish kuchi momentini radius bo'ylab ishqalanish kuchi momentini integrallash orqali aniqlash mumkin.

$$F_{fr} = k \vartheta = k \omega r \quad (28)$$

Bu yerda  $k$  – ishqalanish koeffitsienti (havo qarshiligi),  $v$  – chiziqli tezlik,  $\omega$  – burchak tezligi,  $r$  – qurilmaning egrilik radiusi.

Qurilmaning past tezliklarida havoning qarshilik kuchi bilamizki tezlikning birinchi darajasiga to'g'ri proporsional bo'ladi:

$$M_{fr} = k \omega dr \quad (29)$$

$$M_{fr} = \int_{r_2}^{r_1} k \omega r dr \quad (30)$$

$$M_{fr} = \frac{k \omega (r_1^2 - r_2^2)}{2} \quad (31)$$

$$M_t = I \varepsilon + \frac{k \omega (r_1^2 - r_2^2)}{2} \quad (32)$$

Nyutonnig aylanma harakatlar dinamikasi uchun ikkinchi qonuniga binoan qurilmaning aylanma harakat kuch momenti  $M = I \varepsilon$  orqali aniqlanadi.

Burchak tezlanishi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} \quad (33)$$

Yuqoridagi ifodalardan foydalanib, qurilmaning aylanish dinamikasi uchun asosiy tenglamani olish mumkin:

$$I \frac{d\omega}{dt} + \frac{k\omega(r_1^2 - r_2^2)}{2} = M_t \quad (34)$$

Endi (34) tenglamani yechishga o'tamiz:

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{k\omega(r_1^2 - r_2^2)}{2I} = \frac{M_t}{I} \quad (35)$$

Agar belgilash kiritib olsak:

$$\gamma = k \frac{(r_1^2 - r_2^2)}{2I} \quad (36)$$

unda tenglamani quyidagi ko'rinishda olish mumkin:

$$\frac{d\omega}{dt} + \gamma\omega = \frac{M_t}{I} \quad (37)$$

Differensial tenglamani yechish quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\omega = \frac{M_t}{I\gamma} + Ce^{-\gamma t} \quad (38)$$

Boshlang'ich vaqtda  $t=0$ ,  $\omega=0$  desak, u holda

$$\sigma = \frac{M_t}{I\gamma} + C \quad C = -\frac{M_t}{I\gamma}$$

va quyidagi ko'rinishdagi yechim yuzaga keladi:

$$\omega = \frac{M_t}{I\gamma} + 1 - e^{-\gamma t} \quad (39)$$

va quyidagi ko'rinishdagi yechim yuzaga keladi:

$$\omega = \frac{2M_t}{k(r_1^2 + r_2^2)} \left( 1 - e^{-\frac{k(r_1^2 - r_2^2)}{2I} t} \right) \quad (40)$$

Olingan (40) tenglamadan quyidagi fizik xulosalarni olish mumkin. Qurilma harakatlanishning boshlang'ich vaqtlarida tezlanish bilan harakat qiladi va ma'lum vaqtdan keyin esa o'zgarmas tezlikka erishadi. Bunga sabab havoning ishqalanish kuchi momenti bilan motorning qurilmaga beradigan kuch momenti tenglashib qolgani. Odatda bu holatga erishish uchun 1-2 soniya kerak bo'ladi. Tabiiyki, bu jarayon qurilmaning inersiya momentiga, havo qarshiligik kuchiga va elektromotor kuvvatiga bog'liq.

Bu yerda inersiya momenti quyidagicha aniqlanadi:

$$I_z = \frac{2m(a^2 - b^2)}{a^3 - b^3} \left( \frac{1 + \cos^2 \alpha}{24} + \frac{h^2 \sin^2 \alpha}{5(a-b)^2} \right) \quad (41)$$

$$\alpha = \arctg \left( \frac{2h}{\sqrt{3}(a-b)} \right) \quad (42)$$

C# 9.0 dasturlash tili imkoniyatlaridan kelib chiqib, energetik qurilmaning ishlashini ko'rsatish va dastlabki tadqiqotlarni amalga oshirish uchun mo'ljallangan yangi "ST Vertical" EHM uchun dasturiy mahsulot ishlab chiqildi, bu EHM dasturiy mahsulotga IMAdan № DGU 09198 raqamli "Guvohnoma" olindi.

Yarimo'tkazgichli qurilmalarni modellashtirish bu eksperimental aniqlangan material xususiyatlaridan va fundamental nazariyalardan foydalanib qurilamning ishlash prinsipini va uning parametrlarini aniqlashdir. Yarimo'tkazgichli qurilmaning strukturasi qarab, modellashtirish oddiydan kompleksgacha murakkablashib boradi. Eng oddiy yarimo'tkazgichli qurilma bu dioddir. Qening asosini ham diod tashkil qiladi. Lekin, quyosh elementi modellashtirish murakkab bo'lgan yarimo'tkazgichli qurilmalar tarkibiga kiradi. Chunki u optoelektronik qurilma hisoblanadi va modellashtirish ikki bosqichda olib boriladi. Birinchi optik

xususiyatlari aniqlanadi. Buning uchun asosan uch xil “*Ray Tracing*”, “*Transfer Matrix Method (TMM)*” yoki “*Beam Propagation*” metodlaridan keng foydalanildi. Ushbu ilmiy ishda optik xususiyatalarni aniqlash uchun TMM metodidan foydalanildi. TMM tushuvchi, qaytuvchi va o‘tuvchi nurlarning energiyalari orasidagi munosabatlarni formula (43) da berilganidek matritsa yordamida ifodalaydi.

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

bu yerda:  $M$  — matritsa,  $E_i$  — tushuvchi yorug‘likning elektr maydon kuchlanganligi,  $E_r$  — qaytuvchi yorug‘likning elektr maydon kuchlanganligi,  $E_t$  — o‘tuvchi yorug‘likning elektr maydon kuchlanganligi.

QEda turli muhitlar ya’ni havo va kremniy kesishmalari mavjud bo‘lgani uchun optik chegaraviy shartlar berilishi shart. Optik chegaraviy shartlar yorug‘likning parametralriga qarab ikkiga bo‘linadi: energiya va burchak. Ikki muhit chegarasida tushayotgan, qaytayotgan va o‘tayotgan nurlarning energiyalari orasidagi munosabatlar (44) formulada berilgan Frenel formulalari yordamida aniqlanadi.

$$\begin{cases} r_t = \frac{n_1 \cos \beta - n_2 \cos \gamma}{n_1 \cos \beta + n_2 \cos \gamma} \\ t_t = \frac{2n_1 \cos \beta}{n_1 \cos \beta + n_2 \cos \gamma} \\ r_p = \frac{n_1 \cos \gamma - n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \gamma + n_2 \cos \beta} \\ t_p = \frac{2n_1 \cos \beta}{n_2 \cos \beta + n_1 \cos \gamma} \end{cases} \quad (44)$$

bu yerda:  $r_t$  va  $t_t$  — ko‘ndalang qutblangan elektromagnit to‘lqin uchun frenel koeffitsientlari,  $r_p$  va  $t_p$  — parallel qutblangan elektromagnit to‘lqin uchun frenel koeffitsientlari,  $n_1$  va  $n_2$  — birinchi va ikkinchi muhitalarning nur sindirish ko‘rsatkichi,  $\beta$  — yorug‘lik nurining tushish burchagi hamda  $\gamma$  — singan nur va vertical orasidagi burchak.

Ikki muhit chegarasida burchaklar orasidagi munosabat esa formula (45) da berilgan Snelli qonuni orqali aniqlanadi.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(\gamma)}{\sin(\theta)}, \quad \beta = \theta \quad (45)$$

bu yerda:  $\theta$  — qaytayotgan yorug‘lik va vertikal orasidagi burchak.

TMM va optik cheraaviy shartlardan foydalanib quyosh elementining asosiy optik parametrlari qaytish, o‘tish va yutulish koeffitsientlari aniqlanadi. Modellashtirishni mantiqiy davom ettirish uchun kvant rentabillik funksiyasi va Burger-Lambert qonunidan foydalanib optik generatsiya hisoblanadi. Kvant rentabillik bu mantiqiy funksiya bo‘lib quyosh elementida yutulayotgan foton energiyasi QEda ishlatilgan material ta’qiqlangan zona kengligidan katta bo‘lsa 1 ga teng bo‘ladi ya’ni elektron-kovak juftligini hosil qiladi va kichik bo‘lsa 0 ga teng bo‘ladi ya’ni ushbu foton yutilmaydi va elektron-kovak juftligi hosil bo‘lmaydi. Ushbu metoddan foydalanib QEning ixtiyoriy hajmidagi fotogeneratsiyalangan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi aniqlanadi.

Optik xususiyatlar aniqlangandan so‘ng elektr xususiyatlari aniqlanadi. Buning uchun eng asosiysi formula (46) da berilgan Puasson tenglamasi hisoblanadi.

$$\Delta\varphi = -\frac{q}{\varepsilon}(p - n - N_D + N_A) \quad (46)$$

bu yerda:  $\varepsilon$  — dielektrik singdiruvchanlik,  $n$  va  $p$  — elektron va kovaklarning konsentratsiyasi,  $N_D$  va  $N_A$  — donor va akseptor kirishmalarning konsentratsiyasi,  $q$  — elektron zaryadi.

Puasson tenglamasi tarkibidagi  $p$ - va  $n$ - zaryad tashuvchilar konsentratsiyasini formula (47) da berilgan Fermi funksiyasi yordamida aniqlanadi.

$$n = N_c F_{1/2} \left( \frac{E_{F,n} - E_c}{kT} \right) \text{ va } p = N_v F_{1/2} \left( \frac{E_v - E_{F,p}}{kT} \right) \quad (47)$$

bu yerda:  $N_c$  va  $N_v$  o‘tkazuvchanlik va valent zonadagi ruxsat etilgan holatlar zichligi,  $E_c$  — o‘tkazuvchanli zonasining minimal energiyasi,  $E_v$  — valent zonasining maksimal energiyasi,  $T$  — temperatura,  $k$  — Bolsman doimiysi,  $E_{F,n}$  va  $E_{F,p}$  Kvazi-Farmi sath energiyalari.

Quyosh elementidagi  $p$ - $n$  o‘tish tufayli ichki elektr maydon yuzaga keladi va elektron-kovak juftligini bir-biridan ajratadi. So‘ng zaryad tashuvchilar ko‘chishi yuzaga keladi. Zaryad tashuvchilar ko‘chishi esa elektr tokini hosil qiladi. *Sentaurus TCAD* da zaryad tashuvchilar ko‘chishini hisoblash uchun asosan 4 ta model mavjud: *Dreyf-Diffuzion*, *Termodinamik*, *Hydrodinamik* va *Monte Carlo*. Ushbu ilmiy ishda quyosh elementiga temperaturaning ta’siri hisobga olinmagani uchun zaryad tashuvchilar ko‘chishini hisoblash uchun formula (48) da berilgan *Dreyf-Diffuzion* modeldan foydalanildi.

$$\begin{aligned} \vec{J}_n &= \mu_n (n \nabla E_c - 1.5nkT \nabla \ln m_n) + D_n (\nabla n - n \nabla \ln \gamma_n) \\ \vec{J}_p &= \mu_p (p \nabla E_v + 1.5pkT \nabla \ln m_p) - D_p (\nabla p - p \nabla \ln \gamma_p) \end{aligned} \quad (48)$$

bu yerda:  $J_n$  va  $J_p$  elektron va kovaklar hosil qilayotgan tok zichligi,  $m_n$  va  $m_p$  elektron va kovaklarning effektiv massasi,  $\gamma_n$  va  $\gamma_p$  Fermi funssiyasi yordamida aniqlanadigan kattaliklar,  $D_n$  va  $D_p$  elektron va kovakalrning diffuziya koeffitsienti,  $\mu_n$  va  $\mu_p$  elektron va kovaklarning harakatchanligi.

Zaryad tashuvchilarning harakatchanligini hisoblash uchun Mazetti formulasidan foydalanildi. Mazetti empirik formulasi zaryad tashuvchilarning harakatchanligiga temperatura, kirishma konsentratsiyasi ta’sirini va ular bilan fonon sochilishini hisobga oladi. Kremniyning noto‘g‘ri o‘tishli yarimo‘tkazgich bo‘lgani uchun, faqat kremniydan yasalgan qurilmalarni modellashtirishda radiativ rekombinatsiya hisobga olinmaydi. Shuning uchun faqat Oje (Auger) va Shokli-Rid-Xolla (Shokley-Read-Hall) rekombinatsiyasining hisobga olinadi.

QElarini sifatli bo‘lishida metall kontaktlarning roli katta. Ushbu ilmiy ishda QEning ustki va ostki qismida omik kontakt hosil qilindi. Hisoblash sonli metodlarda olib borilayotgani tufayli modelga elektr chegaraviy shartlarni ham kiritilishi kerak. Kontakt va yarimo‘tkazgich orasida omik o‘tish hosil qilinganligi tufayli formula (49) da berilgan Omik chegaraviy shartlardan foydalanildi.

$$\begin{aligned}\vec{J}_M \cdot \hat{n} &= (\vec{J}_n + \vec{J}_p + \vec{J}_D) \cdot \hat{n} \\ \phi &= \Phi_M - \Phi_0 \\ n &= n_0 \\ p &= p_0\end{aligned}\tag{49}$$

bu yerda:  $J_m$  — metaldagi zaryad tashuvchilar hosil qilayotgan tok zichligi,  $J_D$  — diffusion tok zichligi,  $\phi$  — elektrostatik potensial,  $\Phi_m$  — metaldagi fermi potentsiali,  $\Phi_0$  — muvozanat holatidagi elektrostatik potensial,  $n_0$  va  $p_0$  muvozanat holatidagi elektron va kovaklar konsentratsiyasi.

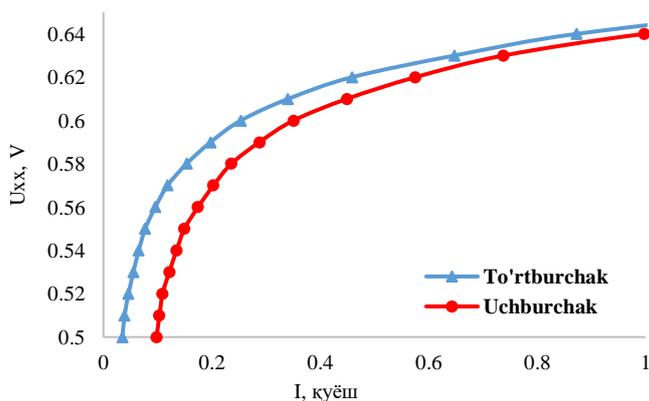
Quyosh elementlarini sifatini aniqlash uchun asosan “*Suns-Voc*” xarakteristikadan foydalaniladi. Ushbu xarakteristika yordamida Qening oldi va orqa yuzasining passivatsiya va kontaktlar sifatini baholash mumkin. Tajribada QElarining “*Suns-Voc*” xarakteristikasini aniqlash uchun *Sinton* qurilmalaridan foydalanildi. Shuningdek, 9-rasmda tajribada o‘lchangan o‘lchami 1352 mm<sup>2</sup> bo‘lgan polikristall va 10-rasmda monokristall kremniy asosli to‘rtburchak va uchburchak shakldagi QElarining salt yurish kuchlanishini yorug‘lik intensivligiga bog‘liqligi tasvirlangan. To‘rtburchak shakldagi polikristall kremniy asosli QElarining salt yurish kuchlanishi past yorug‘lik intensivliklarda uchburchak shakldagi nisbatan yuqoriroq kuchlanishga ega bo‘ldi. Masalan, 0,1 quyosh yorug‘lik intensivligida, to‘rtburchak shakldagi na‘munaning salt yurish kuchlanishi uchburchak shakldagiga nisbatan 0,06 V ga kattaligi aniqlandi. Yorug‘lik intensivligi ortgan sari ushbu farq kichiklashib bordi. 1 quyosh yorug‘lik intensivligida farq 0,01 V gacha kamaydi. Bunga sabab, past yorug‘lik intensivligida generatsiya tezligi ham past bo‘ladi. Ya‘ni quyosh elementini sifatini belgilashda rekombinatsiya asosiy rolni o‘ynaydi. Chunki, polikristall kremniydagi donadorli chegaralari mavjud bo‘lgani uchun rekombinatsiya tezligi yuqoriroq bo‘ladi. Bundan tashqari bir xil yuzali to‘rtburchak shaklning perimetri uchburchakka nisbatan kichik bo‘ladi. Ya‘ni zaryad tashuvchilarning Qening chetlarida harakatlanishi ularni rekombinatsiyaga uchrash ehtimolligini orttiradi. Ya‘ni Qening yuzasi va chetlarida to‘lmagan bog‘lar tufayli nuqsonlar hajmdagiga nisbatan ko‘proq bo‘ladi. To‘lmagan bog‘lar esa kislorodni o‘zida tutib rekombinatsiya markazlarini hosil qiladi. QElarining oldi va orqa yuzasi  $SiN_x$  yoki  $SiO_2$  yordamida passivatsiyalanadi, lekin ularni yon tomonlari passivatsiyalanmaydi. Polikristall kremniy asosli QEga tushayotgan yorug‘lik intensivligi ortganda generatsiya tezligi ham ortadi. Shuning uchun, polikristall kremniyning salt yurish kuchlanishiga shaklning ta‘siri ham kamayib boradi.

Demak, polikristall kremniy asosli quyosh elementida asosan shaklning o‘zgarishi rekombinatsiya tezligiga ta‘sir qilishi ma‘lum bo‘ldi. Monokristall kremniy asosli quyosh elementida esa uchburchak shakldagi quyosh elementining salt yurish kuchlanishi to‘rtburchakka nisbatan yuqori bo‘ldi. Bundan tashqari, intensivlik ortganda salt yurish kuchlanishlari orasidagi farq ham ortdi. Monokristall kremniyda rekombinatsiya faqat kirishma atomlar ionlanishi va ularni rekombinatsiya markazlariga aylanishi tufayli yuzaga kelgani uchun past intensivliklarda ham kuchlanishlar farqi juda kichik bo‘ldi. Intensivlik ortganda esa fotogeneratsiyalanayotgan elektron-kovaklar juftligi ham ortadi. Zaryad

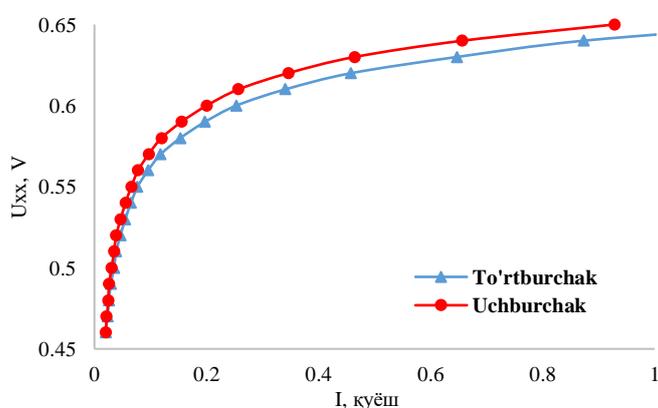
tashuvchilarning miqdorini keskin ortishi monokristall kremniy asosli QElarida elektron-elektron sochilishining ehtimolligini ortishiga sabab bo‘ladi.

«Sinton Suns-Voc» qurilmasida QElarining psevdovolt-ampexarakteristikasini ham aniqlash mumkin.

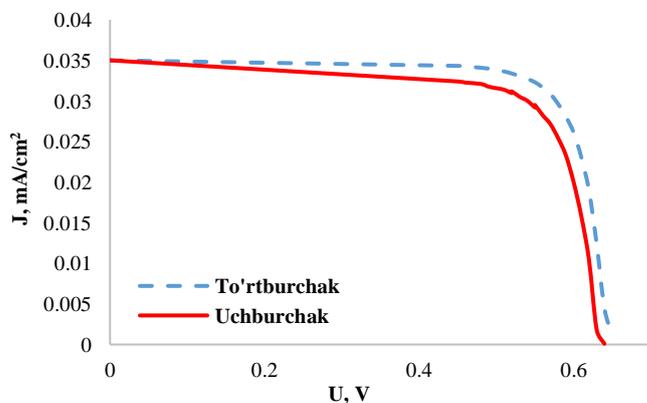
11-rasmda o‘lchami 1352 mm<sup>2</sup> bo‘lgan polikristall va 12-rasmda monokristall kremniy asosli to‘rtburchak va uchburchak shakldagi quyosh elementlarining psevdovolt-ampexarakteristikasi tasvirlangan. Polikristall kremniy asosli QE uchun to‘rtburchak shaklidagi na‘muna yaxshiroq volt-ampexarakteristikaga erishdi. Monokristall kremniyda esa uchburchak shakldagi na‘muna yaxshiroq volt-ampexarakteristikaga erishdi. Lekin monokristall kremniy asosli quyosh elementida volt-ampexarakteristikasidagi farq juda kichik bo‘ldi.



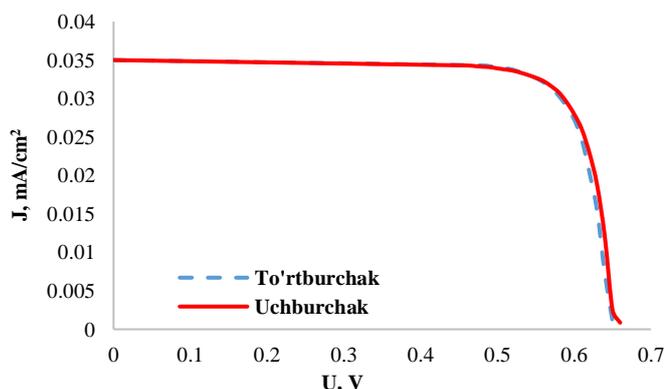
**9-rasm.** O‘lchami 1352 mm<sup>2</sup> bo‘lgan polikristall kremniy asosli to‘rtburchak va uchburchak shakldagi quyosh elementlarining salt yurish kuchlanishini yorug‘lik intensivligiga bog‘liqligi



**10-rasm.** O‘lchami 1352 mm<sup>2</sup> bo‘lgan monokristall kremniy asosli to‘rtburchak va uchburchak shakldagi quyosh elementlarining salt yurish kuchlanishini yorug‘lik intensivligiga bog‘liqligi

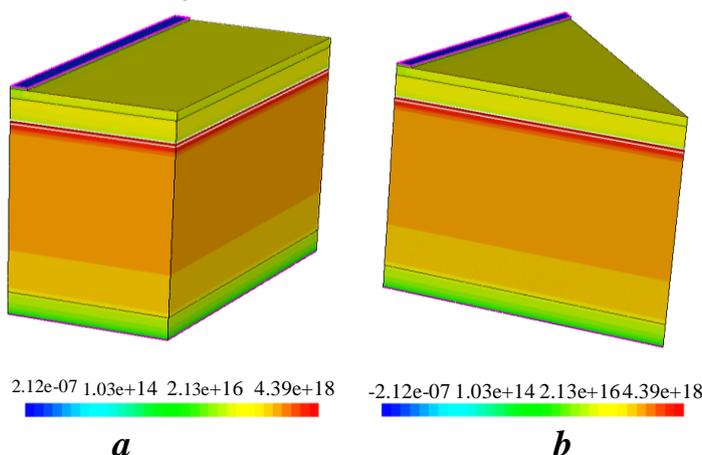


**11-rasm.** O‘lchami 1352 mm<sup>2</sup> bo‘lgan polikristall kremniy asosli to‘rtburchak va uchburchak shakldagi quyosh elementlarining volt-ampexarakteristikasi

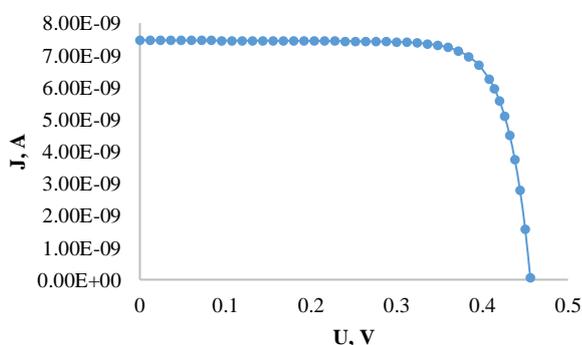


**12-rasm.** O'lchami 1352 mm<sup>2</sup> bo'lgan monokristall kremniy asosli to'rtburchak va uchburchak shakldagi quyosh elementlarining volt-ampere xarakteristikasi

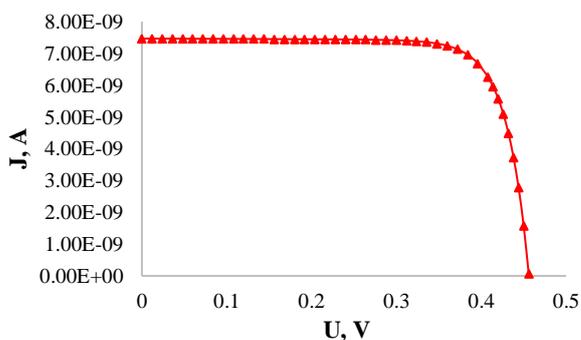
Quyosh elementining ishlashiga asosan rekombinatsiya jarayoni ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun, 13-rasmda aktiv yuzalari teng bo'lgan parallelepiped va uchburchak prizma shaklidagi kremniy asosli QEidagi Shokli-Rid-Xoll (*Shokley-Read-Hall*) rekombinatsiya miqdorini taqsimoti tasvirlangan. Ikkala element uchun ham rekombinatsiya taqsimoti qatlamlar bo'yicha deyarli bir xilligi aniqlandi. Taqsimotda baza sohada rekombinatsiya miqdori kattaligi tasvirlangan, chunki baza sohasida Shokli-Rid-Xoll (*Shokley-Read-Hall*) (*SRH*) rekombinatsiya ulushi Auger rekombinatsiyasiga qaraganda kattaroq bo'ladi. Kirishma konsentratsiyasi kritik qiymatdan ortganda, *SRH* rekombinatsiyasi ortmaydi lekin Oje (*Auger*) rekombinatsiyasi miqdori keskin ortadi. Shuning uchun emitter sohada Oje (*Auger*) rekombinatsiyasini va baza sohada *SRH* rekombinatsiyasining ulushi katta bo'ladi.



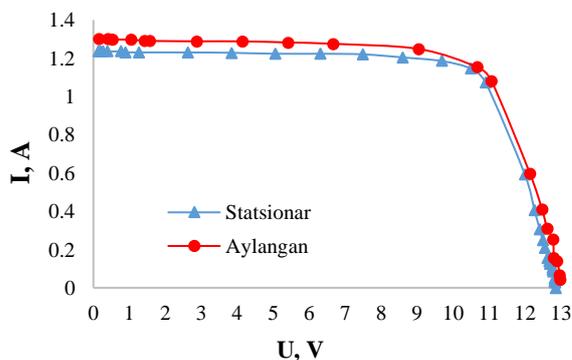
**13-rasm.** Aktiv yuzalari teng bo'lgan parallelepiped (a) va uchburchak prizma (b) shaklidagi kremniy asosli quyosh elementidagi Shokli-Rid-Xoll (*Shokley-Read-Hall*) rekombinatsiya miqdorini taqsimoti [birlik o'lchami:  $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ ]



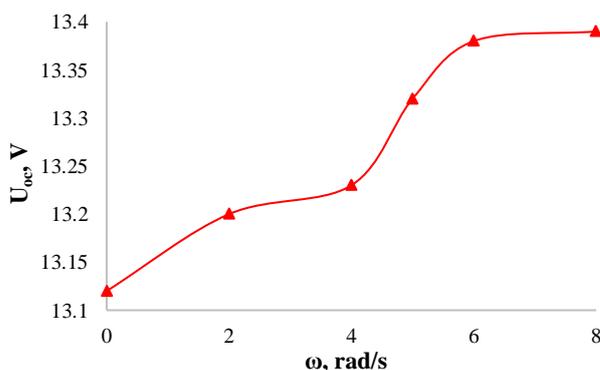
**14-rasm.** Modellashtirishda aniqlangan aktiv yuzalari teng bo'lgan parallelepiped shaklidagi kremniy asosli quyosh elementining volt-ampere xarakteristikasi



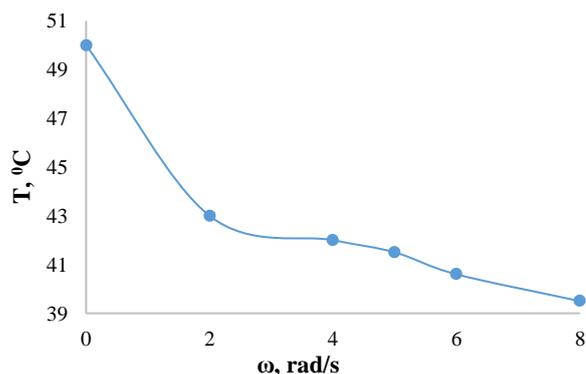
**15-rasm.** Modellashtirishda aniqlangan aktiv yuzalari teng bo‘lgan uchburchak prizma shaklidagi kremniy asosli quyosh elementining volt-ampere xarakteristikasi



**16-rasm.** O‘lchami  $56 \times 56 \text{ mm}^2$  bo‘lgan 24 ta kremniy asosli quyosh elementining ketma-ket ulanishidan hosil qilingan prizma shakldagi 3D formatli fotoenergetik qurilmani stasionar va aylanayotgan holatdagi volt-ampere xarakteristikalari



**17-rasm.** O‘lchami  $56 \times 56 \text{ mm}^2$  bo‘lgan 24 ta kremniy asosli quyosh elementining ketma-ket ulanishidan hosil qilingan prizma shakldagi 3D formatli fotoenergetik qurilmani salt yurish kuchlanishini qurilmaning burchak tezligiga bog‘liqligi



**18-rasm.** O‘lchami  $56 \times 56 \text{ mm}^2$  bo‘lgan 24 ta kremniy asosli quyosh elementining ketma-ket ulanishidan hosil qilingan prizma shakldagi 3D formatli fotoenergetik qurilma yuza temperaturasini qurilmaning burchak tezligiga bog‘liqligi

Qurilma aylanganda uning fotoelektrik parametrlari yaxshilanishi aniqlandi. Shuning uchun, uning fotoelektrik parametrlarini aylanish tezligiga bog‘liqligi tadqiq qilindi. Shuning uchun, 17-rasmda 3D formatli FMni salt yurish kuchlanishini va 18-rasmda yuza temperaturasini qurilmaning burchak tezligiga bog‘liqligi tasvirlangan.

Qurilmaning yuzasining temperaturasi aylanmayotgan holatda  $50^\circ\text{C}$  va salt yurish kuchlanishi 13,12 V ga teng bo‘ldi. Aylanish tezligining 0-6 rad/s oralig‘ida qurilmaning salt yurish kuchlanishi keskin 0,36 V ga ortdi va yuzasining

temperaturasi  $9,4^{\circ}\text{C}$  ga kamaydi. 6-8 rad/s aylanish tezligi oralig'ida esa salt yurish kuchlanishi juda oz 0,01 V ga ortdi, temperature ham bunga mos ravishda  $1,1^{\circ}\text{C}$  ga kamaydi. Demak, fotoenergetik qurilmaning tezligi ortib borganda uning salt yurish kuchlanishi aniq qiymatga asimptotik yaqinlashadi, yuzaning temperaturasi esa atrof-muhit temperaturasiga asimptotik yaqinlashib kamayib boradi lekin atrof-muhit temperaturasidan past bo'la olmaydi. Shuning uchun, ushbu uslub yordamida fotoenergetik qurilmaning yuzasini qizib ketishini oldini olish mumkin lekin uni past temperaturalargacha sovuta olmaydi.

Uchburchak va to'rtburchak shakldagi mono- va polikristall kremniy asosli QEleri eksperimental tadqiq qilinganda, monokristall kremniy asosli QEini uchburchak shaklda va polikristall kremniy asosli QEini to'rtburchak shaklda kesilganda ulanring fotoelektrik parametrlari yaxshiroq bo'lishi aniqlandi. Shuning uchun, prizma shakldagi FQlarni yasashda to'rtburchak shakldagi polikristall kremniy asosli quyosh elementlaridan va piramida shakldagi FQlarni yasashda uchburchak shakldagi monokristall kremniy asosli quyosh elementlaridan foydalanish taklif qilindi. Xatto, uchburchak va to'rtburchak shakldagi monokristall kremniy asosli quyosh elementi *Sentaurus TCAD* da modellashtirilganda, uchburchak shakldagi quyosh elementining fotoelektrik parametrlari yaxshiroq va foydali ish koeffitsienti yuqoriroq bo'lishi aniqlandi. Ya'ni modellashtirishda olingan natijalar tajriba natijalari bilan mos tushdi.

**“Kremniyli quyosh elementlari asosidagi 3D formatli fotoelektrik modullarni ishlab chiqish va ularning xarakteristikalarini tahlil qilish”** deb nomlangan to'rtinchi bobda kremniyli quyosh elementlari asosida piramida va prizma shaklidagi konstruksiyaga ega fotoelektrik modullarni ishlab chiqish natijalari va xarakteristikalari keltirilgan. 3D formatli FMning sinovdan o'tkazish bo'yicha afzalliklari va ularni amalga oshirishning texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlari tahlil qilingan.

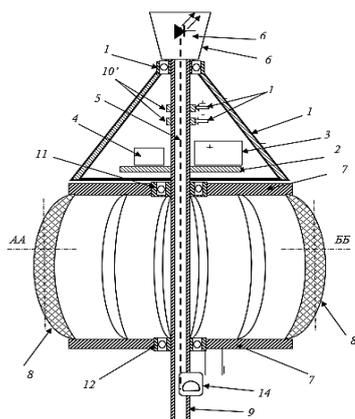
Taklif etilayotgan konstruksiya yuqori va pastki disklardan tashkil topgan erkin aylanadigan qo'shimcha mexanizmga o'rnatilgan aylanuvchi quyosh panelini o'z ichiga oladi va perimetr bo'ylab disklar orasiga qattiq aerodinamik shakldagi shamol pichoqlari o'rnatilgan. QP tekis (kesilgan) ko'p qirrali piramida shaklida qilingan. Fotoelektrik modul akkumulyator va sobit o'q (vertikal o'q)ga o'rnatilgan qattiq disk bazasiga o'rnatilgan boshqaruvchi (kontroller) va quyosh paneli ostida tashqi quvvat iste'moli uchun quvvat manbai bilan jihozlangan. Fotoelektrik modul quyosh paneli ustidagi sobit o'qga o'rnatilgan chiroq bilan jihozlangan.

Oddiy quyosh panelining laboratoriya na'munasi sakkiz qirrali piramida shaklidagi fotoelektrik modul qurilmasi quyidagi o'lchamlarga ega: piramidaning balandligi  $H=39$  sm, perimetri  $P=135$  sm bo'lgan ko'pburchak (sakkizqirra) shaklidagi taglik, panelning egilish burchagi  $60$  gradusli. Asosi sakkizburchakli piramidaning tashqi yuzasi 8 uchburchakdan iborat va formula bilan aniqlanadi:

$$S = 8 \cdot (1/2) \cdot P \cdot h = 4 \cdot P \cdot h \quad (50)$$

Uchburchak asosining uzunligi  $16,9$  sm, apofema  $h=40$  sm. Quyosh panelining tashqi maydoni  $S=2652$  sm<sup>2</sup>. Bir (odnokratnyy) quyosh nurlanishi bilan yoritilganda

aylanmaydigan qurilma deyarli 10 Vatt quvvatga ega elektr energiyasini ishlab chiqaradi.



**19-rasm.** Piramida shaklidagi arxitekturaga ega ishlab chiqilgan fotoelektrik modulning vertikal kesimi

Aylanish mexanizmi (shamol halqasi) bir nechta teshiklari bo‘lgan yuqori va pastki disklarni, perimetri bo‘ylab ikkita disk orasiga vertikal ravishda birlashtirilgan aerodinamik lopaslarni o‘z ichiga oladi. Disklar egrilik radiusi 22 sm, lopalar balandligi 40 sm, lopasning kengligi o‘rtacha 6 sm, lopalar soni 8 dona. Uy ventilyatori yordamida ishlab chiqilgan shamol halqasi 1 daqiqada 20 aylanish chastotasida aylanadi. Fotoelektrik modulning chiqish quvvati va u tomonidan ishlab chiqarilgan energiya bir quyosh nurlanishi bilan yoritilganda qurilmaning aylanadigan va aylanishsiz elektr parametrlarini o‘lchash natijalari aniqlandi. Laboratoriya tekshiruv natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Aylanadigan va aylanmaydigan fotoelektrik modulning ba’zi parametrlari

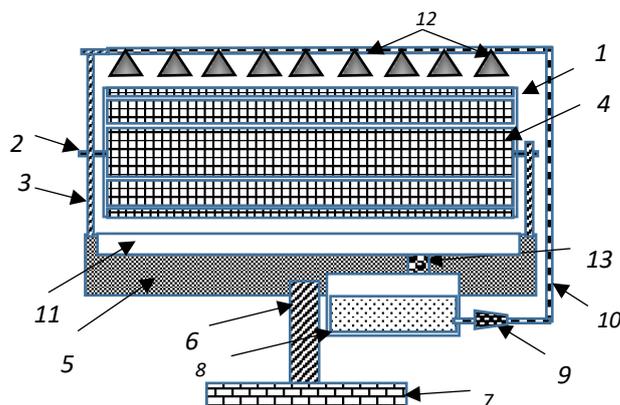
№	Tajriba holati	Tajriba boshida		Vaqt oralig‘ida (4 soat)	
		O‘rtacha quvvat, Vt	Ishlab chiq. energiya, Vt×s	O‘rtacha quvvat, Vt	Ishlab chiq. energiya, Vt×s
1	Yassi FM, S=2652 sm <sup>2</sup>	12	12	7,8	31,2
2	Aylanmanag holatdagi Piramida shaklidagi FM, S=2652 sm <sup>2</sup>	10	10	7	28
3	20 min <sup>-1</sup> chastota bilan aylangan holatdagi piramida shaklidagi FM, S=2652 sm <sup>2</sup>	15	15	15	60

O‘lchov natijalaridan ko‘rinib turibdiki, to‘g‘ri ko‘p qirrali piramida ko‘rinishida quyosh panellari asosida tayyorlangan fotoelektrik modul bir xil maydonga ega tekis quyosh paneliga qaraganda deyarli 2 baravar ko‘proq elektr energiyasini ishlab chiqaradi.

Aylanuvchi fotoelektrik modulning konstruksiyasi ishlab chiqilgan bo‘lib, u gorizontal o‘q atrofida erkin aylanadigan yarimo‘tkazgichli quyosh elementlari asosidagi silindr yoki ko‘pqirrali prizma shaklidagi panel, aylanish mexanizmi, qo‘zg‘almas asos, elektromagnit g‘altaklar, doimiy magnitlar va ulash uchun simlarni o‘z ichiga oladi. Qurilma quyosh batareyasiga yuk sifatida ulangan elektromagnit g‘altaklarni o‘z ichiga oladi, quyosh panellari bilan prizmaning ko‘p yoritilgan tekis tomonining elektromagnit g‘altak qurilmaning ichki qo‘zg‘almas qismiga mahkamlangan doimiy magnit maydonida joylashgan. Qurilma

shuningdek, quyosh panellarining tashqi yuzasini suv bilan tozalash tizimini o‘z ichiga oladi, tozalash tizimi qurilmaning o‘zi tomonidan ishlab chiqarilgan fotoelektrik energiyaning bir qismi bilan ishlaydi. Qurilmaning ishonchligi va samaradorligini oshirish uchun tozalash tizimi toza suv idishi, suv yig‘uvchi moslama, elektr nasos, filtr, shamollatish teshiklari bo‘lgan quvur liniyasi bilan jihozlangan.

Ko‘pburchakli prizmaning tashqi yuzasi ko‘pgina to‘rtburchaklar shaklida bo‘lib, to‘rtburchakning uzunligi kvadrat shaklidagi bir qancha quyosh elementlarining soniga teng  $L = n \times a$ , to‘rtburchakning kengligi kvadrat shaklidagi quyosh elementining tomoni uzunligiga teng  $l = a$ , bu yerda  $n$  – butun son  $a$  – kvadrat shaklidagi quyosh elementining yon tomonining uzunligiga teng bo‘ladi.



**20-rasm.** Prizma shaklidagi arxitekturaga ega ishlab chiqilgan fotoelektrik modulning vertikal kesimi

2-jadval

Tabiiy sharoitda tajribada olingan quyosh fotoelektrik qurilmasining geometrik o‘lchamlari va ba’zi chiqish fotoelektrik parametrlari

No	Qurilmaning turi	Gabariti, sm <sup>3</sup>	Boshlang‘ich $I_{kz}$ , A	Boshlang‘ich $U_{xx}$ , V	W/FIK, $V_t / \%$ ( $\Delta t=0$ soat.)	W/FIK, $V_t / \%$ ( $\Delta t=1$ soat)	W/FIK, $V_t / \%$ ( $\Delta t=2$ soat)	W/FIK, $V_t / \%$ ( $\Delta t=4$ soat)
1	Na‘muna 1.	90×186×65	2,2	24	52,8/16	52,8/16	52,8/16	52,8/16
2	Na‘muna 2.	55×135×48	3,4	24	81,6/16	81,6/16	81,6/16	81,6/16
3	Yassi quyosh paneli	300×12,5×0,5	2,9	24	69,9/16	58/15	46,4/14	34,8/10

Tabiiy sharoitda tajribada olingan yassi quyosh paneli bilan solishtirganda quyosh fotoelektrik qurilmasining geometrik o‘lchamlari va ba’zi chiqish fotoelektrik parametrlari 2-jadvalda keltirilgan.

Tabiiy sharoitda tajribada olingan natijalar va boshqariluvchi yassi quyosh batareyasi natijalari tavsiya etilgan konstruksiya bo‘yicha ishlab chiqilgan quyosh fotoelektrik energetik qurilmasi (2-jadvalning 1-qatorida) uzoq vaqt davomida ishlab chiqargan quvvati va samaradorligining ancha barqaror qiymatlarga ega ekanligini ko‘rsatdi. Bunday holda, tekis quyosh batareyasi (konstruksiya prototipi, 2-jadvalning 3-qatorida) ishlab chiqargan quvvati va samaradorligining barqaror qiymatlarga ega emasligini ko‘rish mumkin.

Fotoelektrik qurilmalardan foydalanishda dolzarb muammolardan biri bu ularga issiq iqlimning salbiy ta’siridir. Yuqoridagi muammolarni hal qilish uchun biz yangi 3D formatli aylanuvchi fotoelektrik energetik qurilmani taklif etdik.

Qurilmaning ishlash prinsipi o‘z-o‘zini sovutishga asoslangan. Biz ushbu qurilma ustida o‘tkazgan tajribalarimiz shuni ko‘rsatdiki, 1 soat ishlagandan keyin ham quyosh paneli yuzasining temperaturasi o‘zgarmadi, foydali ish koeffitsienti va chiqish kuchlanishining pasayishi kuzatilmadi. Bunga sabab, unda “majburiy konveksiya” hosil qilinayotganidir. Ya’ni an’anaviy quyosh panellari o‘zi yutayotgan issiqlik energiyasini atrof muhitga nurlab ulgurmaydi va yuzaning qizishiga olib keladi. Lekin biz taklif qilgan konstruksiyada esa, issiqlikni nurlanishidan tashqari majburiy koveksiya orqali issiqlik yo‘qotish ham sodir bo‘ladi, bu esa atrof muhit bilan temperaturalar farqining yuzaga kelmasiligiga va o‘z-o‘zini sovutib turishiga sabab bo‘ladi.

3-jadval

An’anaviy quyosh panellarida o‘tkazilgan tajriba natijalari

$t$ (min)	0	5	15	30	45	60
$T$ (°C)	33	35	38	42	48	52
$U$ (V)	24	20	18	17	16.3	16
$\eta$ (%)	21	17.5	15.75	14.875	14.26	14

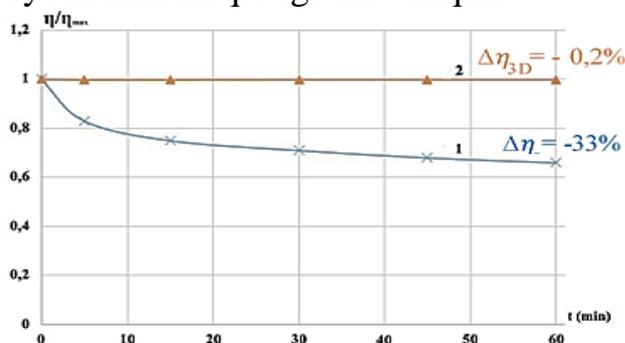
4-jadval

Yangi 3D formatli aylanuvchi fotoelektrik energetik qurilmada o‘tkazilgan tajriba natijalari

$t$ (min)	0	5	15	30	45	60
$T$ (°C)	33	33.2	33.2	33.1	33.1	33.1
$U$ (V)	13.3	13.27	13.27	13.28	13.28	13.28
$\eta$ (%)	21	20.95	20.95	20.97	20.97	20.97

Jadvalda:  $t$  – tajriba o‘tkazish vaqti,  $T$  – quyosh panel yuzasining temperaturasi,  $U$  – quyosh panelning salt yurish kuchlanishi,  $\eta$  – quyosh panelining foydali ish koeffitsienti (FIK).

O‘tkazilgan tajriba natijalaridan xulosa qilib shuni aytishimiz mumkinki, an’anaviy yassi quyosh panellari vaqt o‘tgan sari yuzasining temperaturasi ortadi, bu esa uning foydali ish koeffitsienti  $\eta$  hamda salt yurish kuchlanishi  $U_{xx}$  ning pasayishiga olib keladi. Taklif qilgan yangi 3D formatli aylanuvchi fotoelektrik energetik qurilma vaqt o‘tishi bilan o‘zini sovutishi hisobiga uning yuzasining temperaturasi o‘zgarmaydi, bu esa fotoelektrik qurilmaning foydali ish koeffitsienti  $\eta$  va salt yurish kuchlanishi  $U_{xx}$  ni pasayib ketmasligini ta’minlaydi (21-rasm). Atrof muhit temperaturasi yuqori bo‘lgan hududlarda biz taklif etayotgan qurilmadan foydalanish maqsadga muvofiqdir.



**21-rasm.** An’anaviy yassi quyosh paneli va yangi 3D formatli aylanuvchi fotoelektrik energetik qurilmalarning vaqtga bog‘liq ravishda foydali ish koeffitsientining nisbiy o‘zgarishi grafigi

5-jadval

Piramida shaklidagi arxitekturaga ega ishlab chiqilgan fotoelektrik modulning sinov natijalari

№	Quyosh modulining turi	$T_{maks.},$ $^{\circ}S$	$R_{o'rs},$ $mVt/sm^2$	FIK, %				
				$t=0$	$t=0,5 c$	$t=1,0 c$	$t=2,0 c$	$t=4 c$
1	Yassi yuzali	70	16,8	18	12,6	11,7	11,2	10,7
2	Aylanishsiz 3D FM	66	16,8	18	12,6	11,7	11,2	10,7
3	Aylanayotgan 3D FM	38	23,7	18	18	18	18	18
4	Aylanuvchi 3D FM+KQN	40	24,3	18,6	18,4	18,3	18,3	18,2

3D formatli fotoelektrik energetik qurilma (2-, 3-, 4-qator) va tekis panelning (1-qator) samaradorlik qiymatlarini taqqoslash shuni ko'rsatadiki, 3D formatli aylanadigan fotoelektrik energetik qurilma uzoq sinov davrida o'zining yuqori samaradorligini saqlab qoladi. Shu bilan birga, yassi yuzali quyosh panellari va aylanishsiz 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmaning samaradorligi 18% dan 10,7% gacha kamayadi. Jadvalning 4-qatoriga muvofiq, tajriba vaqtida aylanuvchi fotoelektrik modulning birlik maydonida olingan fotoelektrik energiya miqdori yassi yuzali quyosh paneliga nisbatan 67 % ga ko'proq ekanligini hisoblash mumkin.

5-jadvalda ro'yhati keltirilgan energetik qurilmalar uchun ishlatiladigan komplekt detallar va materiallarning hozirgi kundagi narxi bo'yicha ma'lumotlarni hisobga olgan holda, ularning energetik samaradorligi hamda o'zini qoplash muddati aniqlandi. Natijalar 6-jadvalda keltirilgan.

6-jadval

Tadqiq qilinayotgan fotoelektrik modullarning energetik samaradorligi va o'zini qoplash muddati

№	Quyosh modulining turi	$R_{o'rs},$ $mVt/sm^2$	O'rtacha yillik energiya, $kVt \times s$	Moliyaviy ekvi-valent, ming. so'm	Nisbiy samaradorlik, %	O'rtacha harajat va uning o'sishi \$/%	O'zini qoplash davri, yil
1	Yassi yuzali QP	16,8	100,8	100,8	100	90	10,7
2	Aylanishsiz 3D FM	16,8	100,8	100,8	100	96 / 1,06	11,4
3	Aylanayotgan 3D formatli FM	23,7	142,5	142,5	142,5	99 / 1,1	8,3
4	Aylanuvchi 3D formatli FM+KQN	24,3	146,1	146,1	146,1	105/1,16	8,6

Shunday qilib, kremniyli quyosh elementlari asosida 3D formatli fotoelektrik modullarni joriy etishning texnik va iqtisodiy xarakteristikalari aniqlandi. Ishlab chiqilgan shamol energiyasi hisobiga aylanuvchi 3D formatdagi fotoelektrik modulning (3-qator) nisbiy samaradorligi tekis QPga qaraganda 42,5% ko'proq. Bunday qurilmalar uchun konsentratorlardan foydalanish, ularning samaradorligini 46,1% ga oshirish imkonini beradi. Shu bilan birga, ishlab chiqilgan aylanuvchi 3D formatli fotoelektrik modulning (3-qator) o'rtacha narxi tekis QPdan 10% ga yuqori. Konsentrator qo'yilganda qurilmaning narxi (4-qator) tekis QPga qaraganda 16% ga yuqori bo'ladi.

## XULOSA

Kremniy quyosh elementlari asosidagi 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmalar zamonaviy raqamli-texnologik modellashtirish va eksperimental tahlil orqali keng qamrovli o'rganildi, ularning bir qator yangi xususiyatlari aniqlandi, takomillashtirishga yo'naltirilgan texnik yechimlar ishlab chiqildi hamda quyidagi asosiy ilmiy xulosalar shakllantirildi:

1. Kunduzi fotoelektrik modul sirtining qizib ketishini oldini olish va kechasi qo'shimcha elektr energiyasi ishlab chiqarish maqsadida shamolning mexanik energiyasidan foydalanishga imkon beradigan gibridd quyosh-shamol energetik qurilmasini yaratish konsepsiyasi taklif qilindi va ilmiy asoslandi.

2. Kremniyli quyosh elementlarga va aerodinamik shakldagi parrakli shamoldan aylanish tizimiga ega piramidal 3D formatli fotoelektrik energetik qurilma ishlab chiqildi va foydali model sifatida patentlandi ("Fotoelektrik modul", 24.01.2022 Patent UZ № FAP 01804, Ariza № FAP 2020 0014; 27.01.2020. Rasmiy Bulletin № 2, 2022).

3. Kremniyli quyosh elementlari bilan jihozlangan piramidal va prizmatik shaklidagi konstruksiyaga ega 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmalarning tajriba na'munalari tayyorlandi. Aylanish burchak tezligi 6-8 rad/s bo'lganda fotoelektrik modulning sirt temperaturasi 1,3-1,87 °C/min gacha kamayishi va salt yurish kuchlanishi 0,1-0,27 V gacha ortishi aniqlandi.

4. Vertikal o'qli piramida shaklidagi 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmaning optimal konstruksion parametrlari aniqlandi: yuqori radiusi  $0,07 < r_1 < 0,14$  m, ostki radiusi  $0,35 < r_2 < 0,45$  m, balandligi  $0,32 < h < 0,4$  m. Bunday holatda yassi yuzali quyosh paneliga nisbatan uning sirtiga quyosh nuri ko'proq vakt davomida tushishi va sirti qizib ketishining oldini olish evaziga uning samaradorligi 42,5% ga, shuningdek, konsentrlash usulidan ham foydalanilganda 46,1% ga yuqori bo'lishi aniqlandi.

5. Prizma shaklidagi fotoelektrik modulli va quyosh nurlarini 20÷50 marta konsentrlovchi Frenel linzali mikro-energetik qurilma ishlab chiqildi.

6. Kremniyli quyosh panellariga ega 3D formatli fotoelektrik modulning sanoat na'munasi Start-ap loyihasi doirasida ishlab chiqildi va joriy etildi. Umumiy o'lchamlari: 1600 × 1600 × 1300 mm; chiqish parametrlari:  $I_{kz}=5$  A,  $U_{xx}=24$  V,  $FIK = 16 ÷ 18$  %.

7. Quyosh elementlari geometrik shaklining ularning samaradorligiga ta'siri kremniyli plastinalarning perimetrik yon sirlari bo'ylab fotogeneratsiyalangan nomuvozanat zaryad tashuvchilar rekombinatsion yo'qotishlarining tabiati bilan ilmiy asoslandi. Piramida shaklidagi fotoelektrik energetik qurilma uchun uchburchak shaklidagi monokristall quyosh elementlaridan foydalanish chiqish quvvatini 4% gacha, prizma shaklidagi fotoelektrik energetik qurilma uchun to'rtburchak shaklidagi polikristall quyosh elementlaridan foydalanish esa, quvvatni 10% gacha qo'shimcha orttirishga olib keldi.

8. Kremniyli quyosh elementlariga ega prizma va piramida konstruksiyali 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmalarning raqamli modeli ishlab chiqildi, uning kinematik va fotoelektrik xarakteristikallari orasidagi bog'liqlik ilmiy jihatdan

asoslandi. Bu ishlanma yangi dasturiy mahsulot sifatida davlat ro'yxatidan o'tkazildi (*"ST Vertical"*, Guvohnoma № DGU 09198).

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ РнД.03/27.02.2020.Т.106.02  
ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ  
ПРИ ФЕРГАНСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

---

**АНДИЖАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**МИРЗААЛИМОВ НАВРУЗБЕК АЛИШЕР УГЛИ**

**РАЗРАБОТКА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ 3D ФОРМАТА С  
КРЕМНИЕВЫМИ СОЛНЕЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

**05.05.06 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (РнД) ПО  
ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Фергана – 2023**



## **ВВЕДЕНИЕ (Аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В современном мире непрерывный рост потребности в источниках электрической энергии и обострение глобальных экологических проблем требуют быстрого распространения возобновляемых источников энергии. Наиболее экологичным и перспективным видом возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии, получаемой с помощью полупроводниковых фотоэлектрических солнечных элементов (СЭ). Важно исследовать уникальные возможности повышения эффективности полупроводниковых фотоэлектрических преобразователей энергии, являющихся возобновляемыми источниками энергии, обеспечить эффективное поглощение светового потока, падающего на поверхность солнечных элементов, предотвратить нагрев их поверхности при освещении солнечными лучами, разработать технически оптимальные конструкции высокоэффективных фотоэлектрических энергетических устройств, основанных на моделировании их фотоэлектрических свойств, повысить эффективность их работы и использования.

В мире проводятся научные исследования по совершенствованию конструкций фотоэлектрических энергетических устройств, адаптированных к жаркому климату, особенно по изучению влияния интенсивности света и температуры на солнечный элемент, в частности для предотвращения падения эффективности фотоэлектрических энергетических устройств из-за нагрева их поверхности при освещении концентрированным солнечным светом. В этом направлении приоритетными считаются исследования по повышению эффективности самоохлаждающихся за счет вращения вокруг собственной оси фотоэлектрических устройств различной формы и оптимизации их основных параметров, моделированию изменения фотоэлектрических параметров в зависимости от типа материала и изменения формы солнечных элементов. При этом актуальными задачами считаются моделирование электрофизических параметров солнечных элементов на основе монополикристаллического кремния различной формы при создании призматических и пирамидальных фотоэлектрических устройств, оптимизация характеристик режимов работы, предотвращение снижения КПД солнечных элементов при повышении температуры, проектирование и изготовление фотоэлектрических солнечных элементов устройств с системой охлаждения.

В нашей республике проводится широкий спектр исследований по получению новых материалов, помогающих улучшить использование и эффективность возобновляемых источников энергии и реализуются масштабные меры по их применению на практике. В Стратегии развития Нового Узбекистана, рассчитанной на 2022-2026 годы, определены задачи "бесперебойное снабжение электроэнергией экономики и Активное внедрение технологий "зеленой экономики" во всех сферах, 20-процентное повышение

энергоэффективности экономики"<sup>4</sup>. При реализации этих задач, в частности, важна разработка новых фотоэлектрических энергетических устройств на основе возобновляемых источников энергии, адаптированных к жаркому климату, модернизация существующих, в том числе с использованием фотоэлектрических модулей на основе кремниевых солнечных элементов, выявление научных и технических решений, направленных на повышение их энергоэффективности.

Диссертационное исследование в определенной степени способствует выполнению задач, представленных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии действий по развитию Нового Узбекистан на 2022-2026 годы» от 28 января 2022 г., Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-4779 «О дополнительных мерах по снижению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетической продукции путём повышения энергетической эффективности экономики и привлечения имеющихся ресурсов» от 28 января 2022 г.<sup>5</sup>, № ПП-5063 «О мерах по развитию возобновляемых ресурсов и водородной энергетике» от 9 апреля 2021 года, № УП-3855 «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности» от 17 июля 2018 г.<sup>6</sup>, № УП-3899 «О мерах по повышению эффективности системы интеграции научной и научно-технической деятельности» от 6 августа 2018 г., № УП-5032 «О мерах по повышению качества образования в сфере физики и развитию научных исследований» от 19 марта 2021 г. и других нормативных актах, связанных с деятельностью в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан.** Диссертационная работа соответствует приоритетному направлению развития науки и технологий в Республике «IV. Разработка методов использования возобновляемых источников энергии, создание техники и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других передовых технологий».

**Степень изученности проблемы.** Научные исследования по разработке фотоэлектрических энергетических устройств на основе кремния, высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей энергии и солнечных элементов на основе кремния ведутся в научно-исследовательских центрах и университетах передовых стран мира. В частности ученые из зарубежных стран и стран содружества: Daniel S. Clark, D. Gregory, Christoph Karl La Due (США), Syu-u OZEKI, Mito-shi, Yuji HAMACHI (Япония), E.Skoplaki, J.A.Palyvos (Греция), В.А.Грилихес, В.А.Майоров, С.Н.Трушевский, Д.С.Стребков (Россия), Серж Абракен, Дефиз Жан-Марко, Колетт Жан-Поль (Франция), А.Фаренбрух, Р.Бьюба (Германия) и ряд других исследователей проводят исследования по повышению эффективности фотоэлектрического преобразования энергии на основе построения различных

---

<sup>4</sup>Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28.01.2022 г.

<sup>5</sup> Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-4779 от 10.07.2020 г

<sup>6</sup> Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-3855 от 14.07.2018 г.

фотоэлектрических модулей полупроводниковых *p-n* структур с научной и практической точек зрения.

Широко изучены разработка фотоэлектрических свойств высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей и влияние на них изменения температуры и интенсивности света энергия на основе кремния со стороны академиков АН РУз М.С.Саидова, Р.А.Муминова, М.С.Бахадирханова и профессоров М.Н.Турсунова, Н.Р.Авезова, Р.Алиева и других. Профессора А. Мирзабоев, Н. Матчанов и Б. М. Абдурахманов разработали новые технические и технологические преимущества создания солнечных фотоэлектрических энергетических установок (СФЭУ) с современными автоматизированными системами типа «Smart Grid».

Несмотря на достигнутые положительные результаты в разработке и исследовании новых уникальных технических и технологических решений для создания солнечных фотоэлектрических энергетических устройств, в том числе разработка и исследование фотоэлектрических модулей на основе кремниевых солнечных элементов, с учетом технико-экономических затрат, задача по созданию модулей и энергетических устройств 3D формата на основе моно- и поликристаллических кремниевых солнечных элементов изучена недостаточно.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертационная работа.** Диссертационная работа выполнена в Андижанском государственном университете в соответствии с планом Научно-исследовательских работ кафедры физики “Прикладное исследование возможностей цифрового моделирования и разработки экспериментальных солнечных элементов на моно- и поликристаллической основе, а также гибридных энергетических установок для преобразования концентрированного солнечного излучения” на 2017-2022 гг.

**Целью исследования является** цифровое моделирование и экспериментальная разработка фотоэлектрического модуля 3D формата с кремниевыми солнечными элементами.

**Задачи исследования:**

- разработка и научное обоснование цифровой модели фотоэлектрических модулей 3D формата пирамидальной и призматической конструкции с кремниевыми солнечными элементами различной формы;
- определение кинематических и фотоэлектрических характеристик фотоэлектрических модулей 3D формата пирамидальной и призматической конструкции с кремниевыми СЭ;
- экспериментальная разработка и патентование фотоэлектрического модуля 3D формата;
- освоение методов изготовления и измерения характеристик фотоэлектрических модулей 3D формата с кремниевыми СЭ;

- изготовление, испытание и внедрение опытных образцов энергетических устройств фотоэлектрического модуля 3D формата пирамидальной и призматической конструкций с кремниевыми СЭ, а также определение их технико-экономических характеристик.

**Объектом исследования являются:** физические, технические и энергетические характеристики моделированных цифровой технологией и экспериментально созданных конструкций кремниевых солнечных фотоэлектрических энергетических установок 3D формата.

**Предметом исследования являются:** физические и технологические процессы фотоэлектрического преобразования солнечной энергии в моделированных цифровой технологией и экспериментально созданных конструкциях кремниевых солнечных фотоэлектрических энергетических установок 3D формата.

**Методы исследования:** Цифровое приборно-технологическое моделирование на основе программных систем “С#9,0”, “Sentaurus TCAD”, “Comsol multiphysics” и экспериментально-лабораторные измерительные системы “Sinton Instrument WCT-120” и “Sinton Instrument Suns-Voc”, “EDIBON - Photovoltaic. Units with SCADA: EESFC”, а также официально зарегистрированные программные продукты “STGraphs” и “STVertical”.

**Научная новизна результатов** заключается в следующем:

определено, что на основе оптимизации конструктивных параметров и цифрового моделирования с учетом фотоэлектрических показателей фотоэлектрическое энергетическое устройство 3D формата с пирамидальной конструкции на 42,5% эффективнее чем плоская солнечная панель;

определено, что влияние геометрической формы солнечных элементов на их эффективность, с учетом рекомбинационных потерь фотогенерированных неравновесных носителей заряда по периметрическим граням кремниевых пластин, при использовании треугольных монокристаллических солнечных элементов для фотоэлектрического энергетического устройства пирамидальной конструкции привело к дополнительному увеличению выходной мощности до 4%;

разработан метод снижения температуры его поверхности за счет обеспечения разницы между энергией света, падающего на поверхность солнечного элемента, и энергией теплового излучения, исходящего от этой поверхности;

разработана конструкция гибридного солнечно-ветрового устройства, позволяющая обеспечить непрерывную подачу электроэнергии с учетом вертикального расположения фотоэлектрического энергетического устройства 3D формата с пирамидальной конструкцией.

**Практические результаты** заключаются в следующем:

разработана гибридная солнечно-ветряная энергетическая установка на основе оптимизации конструктивных параметров для непрерывного производства электроэнергии;

определено, что использование треугольных монокристаллических солнечных элементов для фотоэлектрического энергетического устройства пирамидальной конструкции приводит к дополнительному увеличению выходной мощности до 4%, а при использовании прямоугольных поликристаллических солнечных элементов для фотоэлектрического энергетического устройства призматической конструкции приводит к дополнительному увеличению выходной мощности до 10%.

**Достоверность результатов исследования** подтверждается применением современных цифровых методов моделирования в исследовании, логическим единством выполненных работ, использованием современной компьютеризованной измерительной аппаратуры, совпадением полученных экспериментальных результатов с расчетными данными, а также общепринятым методом обработки результатов измерений.

#### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследований заключается в определении влияния геометрической формы солнечных элементов на их эффективность, в углублении знаний о фотогенерирующих носителях заряда, пространственном распределении электрического потенциала и напряженности электростатического поля в эмиттерном и базовом слоях кремниевых пластин, в тепловыделении и плотности тока, вызванных рекомбинацией, а также фотогенерированных неравновесных носителей заряда по периметрическим граням кремниевых пластин являющихся научно обоснованным характером рекомбинационных потерь.

Практической значимостью результатов исследования является разработка и внедрение новой конструкции под названием «Фотоэлектрический модуль» как фотоэлектрического энергетического устройства 3D формата, имеющего пирамидальную конструкцию.

#### **Внедрение результатов исследования:**

На основе полученных результатов по фотоэлектрическому преобразованию солнечной энергии на основе технологии цифрового моделирования кремниевых фотоэлектрических устройств солнечной энергетики в 3D формате и физических процессов экспериментально созданных конструкций:

- внедрено фотоэлектрическое энергетическое устройство 3D формата (FAP 01804 от 24.01.2022 г.) на основе кремниевого солнечного элемента (справка Узэлтехсаноат №04-3/1377 от 3 июня 2022 года). В результате это позволило оптимизировать и повысить эффективность фотоэлектрических энергетических устройств, состоящих из солнечных элементов на основе кремния в производственных условиях;

- В АО «Фотон» были представлены солнечные элементы на основе моно- и поликристаллического кремния треугольной и прямоугольной формы с равными поверхностями (справка №04-3/1377 от 3 июня 2022 года). В результате была достигнута выходная мощность на 4% выше, когда солнечный элемент из монокристаллического кремния был разрезан в треугольной форме,

и на 10% выше выходная мощность, когда солнечный элемент из поликристаллического кремния был разрезан в прямоугольной форме.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 3 международных и 4 республиканских научных конференциях.

**Публикация результатов диссертационного исследования.** По теме диссертации опубликовано всего 25 научных работы, из них 10 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций. Получен 1 патент и 1 авторское свидетельство на новый программный продукт для ЭВМ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертации составляет 111 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики Узбекистан, раскрыт уровень изученности проблемы, определены цели и задачи исследования, приведены объекты исследования, методы исследования, научная новизна и практическая значимость исследования, внедрение результатов исследования, апробация и публикации, а также сведения об объёме и структуре диссертации.

В первой главе **«Виды, принципы работы и характеристики фотоэлектрических модулей с кремниевыми солнечными элементами»** приведен анализ литературных данных по кремниевым солнечным элементам, предназначенным для сборки различных фотоэлектрических модулей и их характеристик. Описан обзор работ по физическим и конструкционным основам создания фотоэлектрических модулей. Проанализированы эксплуатационные особенности и характеристики фотоэлектрических модулей с кремниевыми солнечными элементами, а также известные методы моделирования кремниевых солнечных элементов и фотоэлектрических модулей.

Определено, что известными способами повышения эффективности СФУ являются: разработка прогрессивных технологий изготовления СФЭ, направленных на уменьшение их стоимости и увеличение КПД; использование концентраторов солнечного излучения. Выявлены научные, прикладные и технические проблемы эксплуатации фотоэлектрических модулей с кремниевыми солнечными элементами в условиях жаркого климата. Анализ трудов, связанных с моделированием работы СФУ, выявил необходимость разработки математической и имитационной моделей СФУ, позволяющих корректно определять выходные энергетические характеристики СФУ, максимально приближенные к реальным, и с учетом факторов, влияющих на её характеристики. Показана перспективность использования многопрофильных технологий цифрового моделирования. Исходя из приведенного анализа литературных данных сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, указанные во введении.

Во второй главе **«Научные и методические особенности разработки фотоэлектрических модулей 3D формата с кремниевыми солнечными элементами»** обоснованы выбор кремниевых солнечных элементов для фотоэлектрического модуля 3D формата и методики определения их характеристик. Выполнен экспериментальный анализ характеристик кремниевых солнечных элементов, предназначенных для сборки фотоэлектрического модуля 3D формата. Научно обоснованы методы создания фотоэлектрического модуля 3D формата и определения их характеристик.

В зависимости от геометрической формы предусмотренного СМ 3D формата могут быть использованы как прямоугольные, так и треугольные СЭ.

Можно выбрать СЭ как из монокристаллического, так и из поликристаллического кремния.

При сборке СП или СМ наиболее эффективное заполнение их рабочей площади (поверхности) считается одной из важных практических задач. Естественно, что если СП или СМ имеют прямоугольную площадь, то необходимо использовать прямоугольные СЭ. Такие случаи часто встречаются при изготовлении СП традиционной прямоугольной формы. В данной работе аналогичный случай соответствует СМ 3D формата с призматической формой основного формата, изготовленного для исследования СМ.

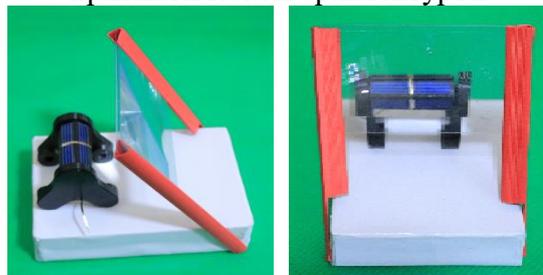
В диссертационном исследовании особое внимание уделено СМ 3D формата с пирамидальной формой основного формата, изготовленного для исследования СМ. В таких конструкциях СМ для более эффективного заполнения рабочей площади следует использовать треугольные СЭ. Поэтому в диссертационном исследовании поставлены задачи по исследованию СЭ различной формы и размеров. Такая задача решена как методом компьютерного моделирования, так и экспериментальным путем.



**Рис. 1.** Фотографии солнечных модулей 3D формата с пирамида-образной и призматической архитектурой и плоской панели



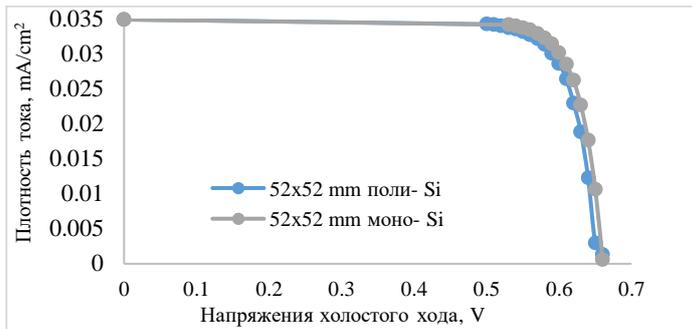
**Рис. 2.** Фотография настольного прототипа солнечного модуля 3D формата с призматической архитектурой



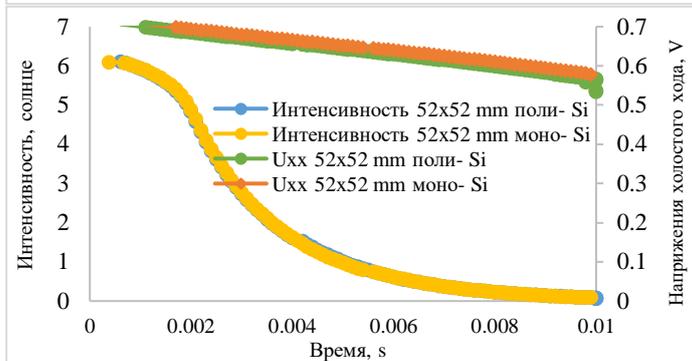
**Рис. 3.** Микро-энергетическая установка фотоэлектрического модуля 3D формата с призматической архитектурой и с линзой Френеля



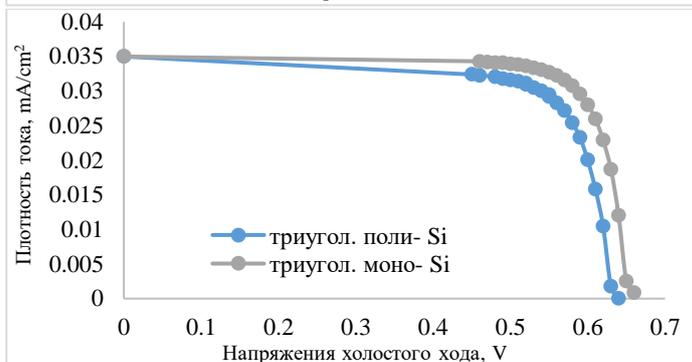
**Рис. 4.** Фотография промышленного образца призматического фотоэлектрического модуля с кремниевыми солнечными панелями



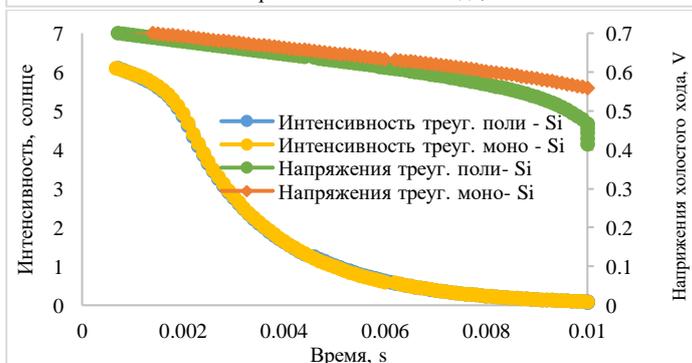
**Рис. 5.** ВАХ СЭ из моно- и поли-Si с размерами 52×52 мм<sup>2</sup>, измеренные при помощи установки “Sinton Instrument Suns-Voc”



**Рис. 6.** Зависимости изменения интенсивности освещенности и напряжения холостого хода от времени экспозиции для СЭ из моно- и поли-Si с размерами 52×52 мм<sup>2</sup>



**Рис. 7.** ВАХ трехстороннего СЭ из моно- и поликристаллического кремния



**Рис. 8.** Зависимости изменения интенсивности освещенности и напряжения холостого хода от времени экспозиции для треугольных СЭ из моно- и поли-Si

В третьей главе «Методы моделирования и исследования характеристик фотоэлектрических модулей 3D формата» обоснованы

методы моделирования фотоэлектрических модулей 3D формата с кремниевыми солнечными элементами. Раскрыта физика разработки динамической модели фотоэлектрических модулей 3D формата. Приведены и проанализированы результаты разработки цифровых моделей и характеристик фотоэлектрических модулей пирамидальной конструкции. Выполнены экспериментальное и расчетное исследование форм солнечных элементов, используемых в 3D форматных фотоэлектрических модулях.

С теоретической стороны представим, что между мощностью падающего света и преобразованной электрической энергией имеется взаимоотношение:

$$P_c = P_{in} - P_{dis} \quad (1)$$

Где  $P_c$  – мощность преобразованной электрической энергии,  $P_{in}$  – мощность падающего света,  $P_{dis}$  – потерянная мощность.

Указанные параметры зависят от интенсивности света и температуры в виде следующих выражений:

$$P_{in} = I \cdot \alpha \cdot S \quad (2)$$

$$P_{dis} = U_L \cdot (T_c - T_a) \cdot S \quad (3)$$

$$P_c = \eta \cdot I \cdot S \quad (4)$$

Здесь  $I$  – интенсивность света,  $S$  – площадь поверхности солнечной панели,  $\eta$  – КПД солнечной панели,  $U_L$  – коэффициент тепловой потери.

$$\eta \cdot I \cdot S = I \cdot \alpha \cdot S - U_L \cdot (T_c - T_a) \cdot S \quad (5)$$

$$\eta \cdot I = I \cdot \alpha - U_L \cdot (T_c - T_a) \quad (6)$$

Пользуясь выражениями, можно определить  $T_c$ :

$$U_L \cdot (T_c - T_a) = I \cdot (\alpha - \eta) \quad (7)$$

$$T_c - T_a = I/U_L \cdot (\alpha - \eta) \quad (8)$$

$$T_c = T_a + I \cdot \alpha / U_L \cdot (1 - \eta/\alpha) \quad (9)$$

Если считать, что в нормальных условиях (НОСТ):

$$U_L = \frac{\alpha \cdot I_{НОСТ}}{T_{c,НОСТ} - T_{a,НОСТ}} \quad (10)$$

Значит, при  $\eta=0,21$ ,  $I=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $\alpha=0,73$  тогда,  $U_L = 26 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$

$$T_c = T_a + I/I_{НОСТ} (T_{c,НОСТ} - T_{a,НОСТ}) (1 - \eta_c/\alpha) \quad (11)$$

$$T_c = T_a + I_a/I_{НОСТ} (U_{L,НОСТ}/U_L) (T_{c,НОСТ} - T_{a,НОСТ}) (1 - \eta_c/\alpha) \quad (12)$$

Коэффициент конвекции для поликристаллических кремниевых солнечных панелей исследован со стороны Скоплаки и для вынужденной конвекции получена эмпирическая формула:

$$q_\omega = 5,7 + 3,8 \cdot \vartheta \quad (13)$$

При появлении разницы в температурах окружающей среды и поверхности солнечной панели имеет место дополнительный теплообмен за счет теплового излучения:

$$q_{rad} = \delta \cdot \varepsilon \cdot (T_c^4 + T_s^4) \quad (14)$$

или

$$q_{rad} = \delta \cdot \varepsilon \cdot (T_c^2 + T_s^2)(T_c + T_s)(T_c - T_s)/(T_c + T_a) \quad (15)$$

Здесь  $T_s$  – температура неба,  $\varepsilon$  – коэффициент поглощения тепла,  $\delta$  – постоянная Больцмана.

$$q = q_\omega + q_{rad} \quad (16)$$

Если в исходном состоянии  $T_c=T_a$ , тогда  $q=q_\omega$ ,  $U_L = q$  и, следовательно, можно получить следующие:

$$T_c = T_a + (I \cdot \frac{\alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta}) \cdot (1 - \frac{\eta_c}{\alpha}) \quad (17)$$

$$T_c = T_a + (\frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta}) \cdot (1 - \frac{\eta_c \cdot T_c}{\alpha}) \quad (18)$$

$$\eta \cdot (T_c) = \eta_{ref} (1 - \beta (T_c - T_{ref})) \quad (19)$$

$$T_c = T_a + (\frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta}) \cdot (1 - \eta_{ref} (1 - \beta (T_c - T_{ref})) / \alpha) \quad (20)$$

$$T_c = T_a + (\frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta}) \cdot (1 - \frac{\eta_{ref}}{\alpha} + \frac{\eta_{ref} \cdot \beta}{\alpha (T_c - T_{ref})}) \quad (21)$$

$$T_c = T_a + (\frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta}) \cdot (1 - \frac{\eta_{ref}}{\alpha} + \frac{\eta_{ref} \cdot \beta \cdot T_c}{\alpha} - \frac{\eta_{ref} \cdot \beta \cdot T_{ref}}{\alpha}) \quad (22)$$

$$T_c (1 - (\frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta}) \cdot (\frac{\eta_{ref} \cdot \beta}{\alpha})) = T_a + (\frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta}) \cdot (1 - \frac{\eta_{ref}}{\alpha}) - (\frac{\eta_{ref} \cdot \beta \cdot T_{ref}}{\alpha}) \quad (23)$$

$$T_c = (T_a + (\frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta}) \cdot (1 - \frac{\eta_{ref}}{\alpha} - \frac{\eta_{ref} \cdot \beta \cdot T_{ref}}{\alpha})) / (1 - (\frac{I \cdot \alpha}{5,7+3,8 \cdot \vartheta}) \cdot (\frac{\eta_{ref} \cdot \beta}{\alpha})) \quad (24)$$

Температура поверхности солнечной панели определяется последним выражением. Здесь  $\eta_{ref}$  - КПД солнечной панели при температуре  $T_{ref}$ .

Рассмотрим взаимоотношения основных параметров изготовленной опытной установки, имеющей форму сеченой пирамиды (Рис. 3.1). Момент силы электромотора приводит к вращению установки и преодолевает сопротивление воздуха:

$$M_t = M + M_{fr} \quad (25)$$

$$M = I \varepsilon \quad (26)$$

$$dM_{fr} = F_{fr} dr \quad (27)$$

Здесь  $M_t$  – момент внешней силы (электромотора),  $M$  – момент движущей силы,  $M_{fr}$  – момент силы трения,  $I$  – момент инерции,  $\varepsilon$  - угловое ускорение.

Из-за пирамидальной формы установки на ее различных высотах действуют различные моменты сил трения воздуха. Если на дифференциальную часть радиуса установки действует дифференциал момента силы трения  $dM_{fr}$ , то общий момент силы трения можно определить путем интегрирования момента силы трения по радиусу:

$$F_{fr} = k \vartheta = k \omega r \quad (28)$$

где  $k$  – коэффициент трения (сопротивления воздуха),  $v$  – линейная скорость,  $\omega$  – угловая скорость,  $r$  – радиус кривизны установки.

Учитываем, что при низких скоростях вращения, сила сопротивления воздуха прямо пропорциональна первой степени скорости:

$$M_{fr} = k \omega dr \quad (29)$$

$$M_{fr} = \int_{r_2}^{r_1} k \omega r dr \quad (30)$$

$$M_{fr} = \frac{k \omega (r_1^2 - r_2^2)}{2} \quad (31)$$

$$M_t = I \varepsilon + \frac{k \omega (r_1^2 - r_2^2)}{2} \quad (32)$$

Согласно второму закону Ньютона-динамике вращательного движения, момент силы определяется выражением:  $M = I \varepsilon$ . Угловое ускорение определяется выражением:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} \quad (33)$$

Используя вышеуказанные выражения, можно получить основное уравнение для вращающей динамики установки:

$$I \frac{d\omega}{dt} + \frac{k \omega (r_1^2 - r_2^2)}{2} = M_t \quad (34)$$

Теперь переходим к решению уравнения (33):

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{k\omega(r_1^2 - r_2^2)}{2I} = \frac{M_t}{I} \quad (35)$$

Если принимать обозначение:

$$\gamma = k \frac{(r_1^2 - r_2^2)}{2I} \quad (36)$$

то можно получить уравнение в виде:

$$\frac{d\omega}{dt} + \gamma\omega = \frac{M_t}{I} \quad (37)$$

Решение дифференциального уравнения принимает вид:

$$\omega = \frac{M_t}{I\gamma} + C e^{-\gamma t} \quad (38)$$

В начальном моменте времени можно считать, что  $m=0$ ,  $\omega=0$ , тогда

$$\sigma = \frac{M_t}{I\gamma} + C \quad C = -\frac{M_t}{I\gamma}$$

можно получить решение уравнения в виде:

$$\omega = \frac{M_t}{I\gamma} + 1 - e^{-\gamma t} \quad (39)$$

следовательно, можно иметь:

$$\omega = \frac{2M_t}{k(r_1^2 + r_2^2)} \left( 1 - e^{-\frac{k(r_1^2 - r_2^2)}{2I} t} \right) \quad (40)$$

Из полученного уравнения (39) можно получить следующие физические заключения. В начале движения установка вращается ускорением и после определенного промежутка времени достигается постоянное значение скорости вращения. При таком постоянном вращении момент силы электромотора сравнивается с моментом силы сопротивления воздуха. Обычно для достижения такого условия требуется время (1-2 секунды). Естественно, этот процесс зависит от момента инерции установки, силы сопротивления воздуха и мощности электромотора.

Момент инерции определяется выражением:

$$I_z = \frac{2m(a^2 - b^2)}{a^3 - b^3} \left( \frac{1 + \cos^2 a}{24} + \frac{h^2 \sin^2 a}{5(a-b)^2} \right) \quad (41)$$

$$\alpha = \arctg \left( \frac{2h}{\sqrt{3}(a-b)} \right) \quad (42)$$

Основываясь на возможности программного языка C# 9.0 разработан новый программный продукт для ЭВМ “*ST VERTICAL*”, предназначенный как для демонстрации работы энергетической установки, так и для выполнения первичных исследований. на который получено официальное «Удостоверение» № DGU 09198.

Моделирование полупроводниковых приборов — это определение принципа действия устройства и его параметров с использованием экспериментально определенных свойств материалов и фундаментальных теорий. В зависимости от структуры полупроводникового устройства моделирование может варьироваться от простого до сложного. Простейшим полупроводниковым прибором является диод. Основой СЭ также является диод. Однако СЭ являются частью полупроводниковых устройств, которые трудно моделировать, потому что это оптоэлектронное устройство и моделирование проводится в два этапа. Определены его первые оптические свойства. Широко использовались три различных метода: трассировка лучей,

метод матрицы переноса (ТММ) и распространение луча. В данном научном исследовании метод ТММ использовался для определения оптических свойств. ТММ представляет собой соотношение между энергиями падающего, отраженного и прошедшего лучей с использованием матрицы, указанной в формуле 43.

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

здесь:  $M$  — матрица,  $E_i$  — напряженность электрического поля падающего света,  $E_r$  — напряженность электрического поля падающего света,  $E_t$  — напряженность электрического поля падающего света.

Поскольку СЭ имеет разные среды, т. е. пересечения воздуха и кремния, то должны быть заданы оптические граничные условия. Оптические граничные условия делятся на два в зависимости от параметров света: энергии и угла. Соотношение между энергиями падающего, падающего и прошедшего лучей на границе двух сред определяется с помощью формул Френеля, приведенных в уравнении (44).

$$\begin{cases} r_t = \frac{n_1 \cos \beta - n_2 \cos \gamma}{n_1 \cos \beta + n_2 \cos \gamma} \\ t_t = \frac{2n_1 \cos \beta}{n_1 \cos \beta + n_2 \cos \gamma} \\ r_p = \frac{n_1 \cos \gamma - n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \gamma + n_2 \cos \beta} \\ t_p = \frac{2n_1 \cos \beta}{n_2 \cos \beta + n_1 \cos \gamma} \end{cases} \quad (44)$$

здесь:  $r_t$  и  $t_t$  — коэффициенты Френеля для поперечно поляризованной электромагнитной волны,  $r_p$  и  $t_p$  — коэффициенты Френеля для параллельно поляризованной электромагнитной волны,  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления первой и второй сред,  $\beta$  — показатель преломления света у угол падения и  $\gamma$  — угол между преломленным лучом и вертикалью.

Соотношение между углами на границе двух сред определяется законом Снелли, приведенным в формуле 44.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(\gamma)}{\sin(\theta)}, \quad \beta = \theta \quad (45)$$

здесь:  $\theta$  — угол между отражающимся светом и вертикалью.

Используя ТММ и оптические граничные условия, основные оптические параметры СЭ определяются коэффициентами отражения, перехода и поглощения. Логически продолжает моделирование, эта функция квантового выхода и оптическая генерация с использованием закона Бюргера-Ламберта. Квантовая эффективность представляет собой логическую функцию, в которой энергия фотонов, поглощаемых СЭ, равна 1, если материал, используемый в СЭ, превышает ширину запрещенной зоны, т. е. образует пару электрон-резонатор, и 0, если она мала, это означает, что фотон не поглощается и пара электрон-резонатор не образуется. С помощью данного метода определяется концентрация фотогенерированных носителей заряда в любом объеме СЭ.

После определения оптических свойств устанавливаются электрические свойства. Наиболее важным для этого является уравнение Пуассона, приведенное в формуле 46.

$$\Delta\varphi = -\frac{q}{\varepsilon}(p - n - N_D + N_A) \tag{46}$$

здесь:  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $n$  и  $p$  — концентрации электронов и полостей,  $N_D$  и  $N_A$  — концентрации донорных и акцепторных входов,  $q$  — заряд электрона.

Концентрации  $p$ - и  $n$ -носителей заряда в уравнении Пуассона определяются с помощью функции Ферми, приведенной в формуле (47).

$$n = N_c F_{1/2}\left(\frac{E_{F,n} - E_c}{kT}\right) \text{ и } p = N_v F_{1/2}\left(\frac{E_v - E_{F,p}}{kT}\right) \tag{47}$$

здесь:  $N_c$  и  $N_v$  проводимость и допустимая плотность в валентной зоне,  $E_c$  - минимальная энергия зоны проводимости,  $E_v$  - максимальная энергия валентной зоны,  $T$  - температура,  $k$  - постоянная Больцмана,  $E_{F,n}$  и  $E_{F,p}$  квазиуровни энергии.

$p - n$  - переход в СЭ создает внутреннее электрическое поле и разделяет пару электрон-резонатор. Затем движутся носители заряда. Движение носителей заряда генерирует электричество. Sentaurus TCAD имеет 4 основные модели для расчета миграции носителей заряда: Дрей-диффузия, термодинамика, гидродинамика и Монте-Карло. Поскольку в данной научной работе не учитывалось влияние температуры на СЭ, для расчета переноса заряда использовалась модель Drift-Diffusion, приведенная в формуле (48).

$$\begin{aligned} \vec{J}_n &= \mu_n(n\nabla E_c - 1.5nkT\nabla \ln m_n) + D_n(\nabla n - n\nabla \ln \gamma_n) \\ \vec{J}_p &= \mu_p(p\nabla E_v + 1.5pkT\nabla \ln m_p) - D_p(\nabla p - p\nabla \ln \gamma_p) \end{aligned} \tag{48}$$

здесь: плотность тока, создаваемая электронами и полостями  $J_n$  и  $J_p$ , эффективная масса электронов и полостей  $m_n$  и  $m_p$ , величины, определяемые функцией Ферми  $\gamma_n$  и  $\gamma_p$ , коэффициент диффузии электронов и полостей  $D_n$  и  $D_p$ , подвижность  $\mu_n$  и  $\mu_p$  электроны и полости.

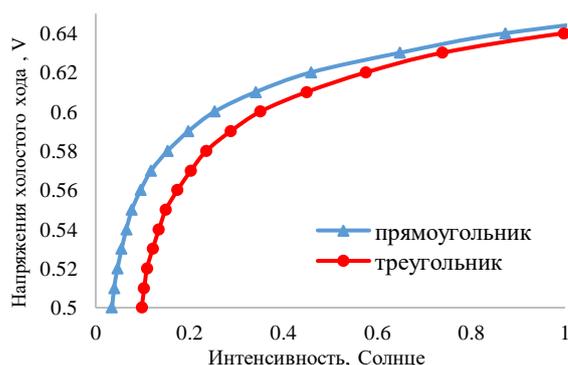
Формула Мазетти использовалась для расчета подвижности носителей заряда. Эмпирическая формула Мазетти учитывает влияние температуры, входной концентрации и рассеяния фононов на подвижность носителей заряда. Поскольку кремний является полупроводником с плохой проводимостью, излучательная рекомбинация не учитывается при моделировании устройств, состоящих только из кремния. Поэтому рассматриваются только рекомбинация Оже (Auger) и Шокли-Рид-Холла (Shokley-Read-Hall).

Металлические контакты играют важную роль в качестве СЭ. В этом научном исследовании сверху и снизу солнечного элемента был установлен омический контакт. Поскольку расчет выполняется численными методами, в модель также должны быть включены электрические граничные условия. В связи с образованием омического перехода между контактом и полупроводником использовались омические граничные условия, приведенные в формуле (49).

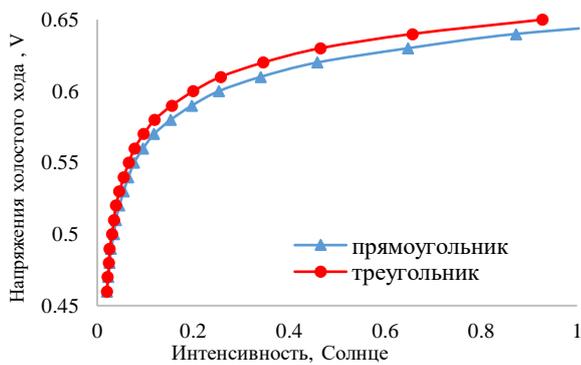
$$\begin{aligned}\bar{J}_M \cdot \hat{n} &= (\bar{J}_n + \bar{J}_p + \bar{J}_D) \cdot \hat{n} \\ \phi &= \Phi_M - \Phi_0 \\ n &= n_0 \\ p &= p_0\end{aligned}\quad (49)$$

здесь:  $J_m$  — плотность тока, создаваемого носителями заряда в металле,  $J_D$  — плотность диффузионного тока,  $\phi$  — электростатический потенциал,  $\Phi_m$  — потенциал Ферми в металле,  $\Phi_0$  — электростатический потенциал в равновесии,  $n_0$  и  $p_0$  равны концентрации электронов и дырок в равновесии.

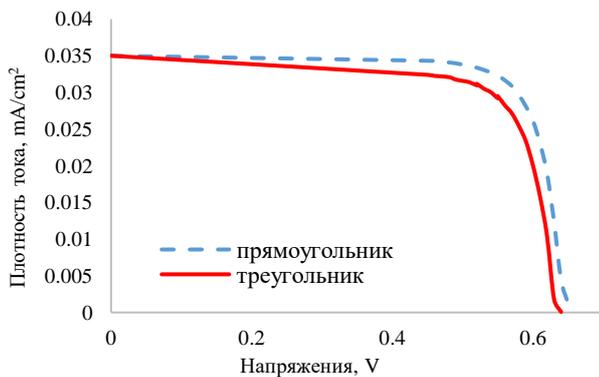
Характеристика «Suns-Voc» в основном используется для определения качества солнечных элементов. Используя эту характеристику, можно оценить пассивацию и качество контакта передней и задней поверхностей СЭ. В эксперименте использовались устройства Sinton для определения характеристик СЭ «Suns-Voc». На рис. 9 и 10 также представлена зависимость силы света поликристаллических (а) и монокристаллических (б) прямоугольных и треугольных СЭ на основе кремния с экспериментальным размером 1352 мм<sup>2</sup> от силы света. Рабочее напряжение прямоугольных солнечных элементов на основе поликристаллического кремния было относительно высоким в треугольной форме при низкой интенсивности света. Например, при силе света 0,1 рабочее напряжение прямоугольного образца оказалось равным 0,06 В по сравнению с треугольным образцом. По мере увеличения интенсивности света разница становилась меньше. 1 разница в силе света уменьшена до 0,01 В. Это связано с тем, что скорость генерации ниже при низкой интенсивности света. То есть рекомбинация играет ключевую роль в определении качества СЭ. Из-за наличия зернистых границ в поликристаллическом кремнии скорость рекомбинации выше. Кроме того, периметр прямоугольника с той же поверхностью меньше, чем у треугольника. То есть движение носителей заряда по краям СЭ увеличивает вероятность их рекомбинации. То есть из-за неполных связей на поверхности и краях СЭ дефекты больше размера. Неполные связи, с другой стороны, удерживают кислород и образуют центры рекомбинации. Передняя и задняя поверхности СЭ пассивированы с использованием  $SiN_x$  или  $SiO_2$ , а боковые стороны не пассивированы. По мере увеличения интенсивности света, падающего на СЭ на основе поликристаллического кремния, увеличивается и скорость генерации. Следовательно, влияние формы на соленость поликристаллического кремния также снижается.



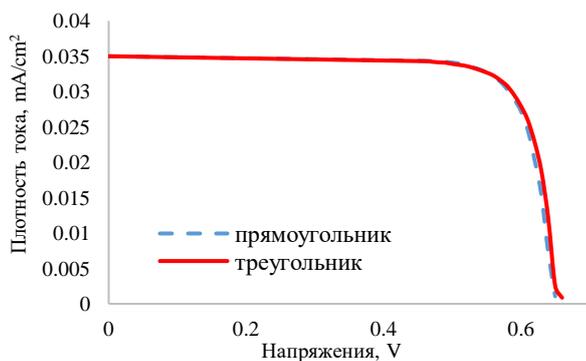
**Рис. 9.** Зависимости напряжения холостого хода от интенсивности света для СЭ в прямоугольной и треугольной формах с размером 1352 мм<sup>2</sup> из поликристаллического кремния



**Рис. 10.** Зависимости напряжения холостого хода от интенсивности света для СЭ в прямоугольной и треугольной формах с размером  $1352 \text{ мм}^2$  из монокристаллического кремния



**Рис. 11.** Вольт-амперные характеристики прямоугольных и треугольных СЭ с размером  $1352 \text{ мм}^2$  из поликристаллического кремния



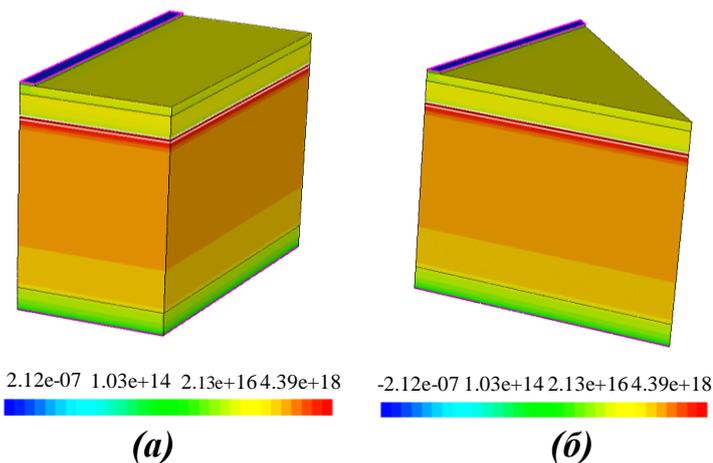
**Рис. 12.** Вольт-амперные характеристики прямоугольных и треугольных СЭ с размером  $1352 \text{ мм}^2$  из монокристаллического кремния

Так, в СЭ на основе поликристаллического кремния было обнаружено, что изменение формы в основном влияет на скорость рекомбинации. В монокристаллическом солнечном элементе на основе кремния рабочее напряжение треугольного СЭ было выше, чем у прямоугольного. Кроме того, разница между рабочими напряжениями соли также повышалась по мере увеличения интенсивности. Поскольку рекомбинация в монокристаллическом кремнии происходит только за счет ионизации вводных атомов и превращения их в центры рекомбинации, разность потенциалов при очень малых интенсивностях была очень мала. С увеличением интенсивности увеличивается и пара фотогенерирующих электрон-дырок. Резкое увеличение количества носителей заряда увеличивает вероятность рассеяния электронов в СЭ на основе монокристаллического кремния.

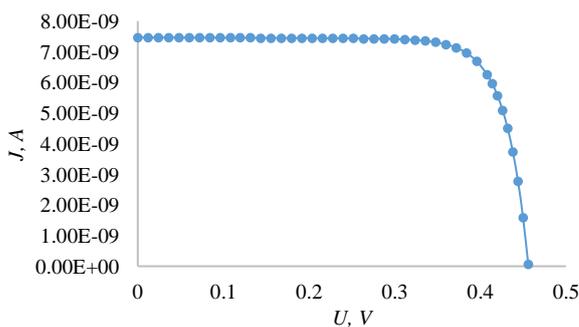
Псевдовольтамперная характеристика СЭ также может быть обнаружена в приборе «Sinton Suns-Voc». На рис. 11 и 12 представлены псевдовольтамперные характеристики поликристаллических и монокристаллических прямоугольных и треугольных СЭ на основе кремния размерами  $1352 \text{ мм}^2$ . Для СЭ на основе поликристаллического кремния прямоугольная структура позволила добиться лучших вольт-амперных характеристик. В

монокристаллическом кремнии треугольная структура имеет лучшие вольт-амперные характеристики. Однако разница в вольт-амперных характеристиках СЭ на основе монокристаллического кремния была очень небольшой.

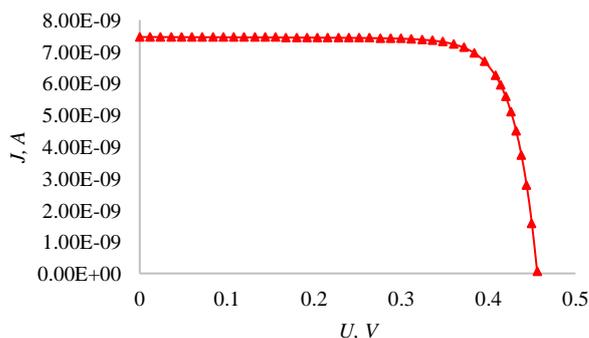
На работу солнечной батареи в основном влияет процесс рекомбинации. Поэтому на рис. 13 показано распределение величины рекомбинации Шокли-Рида-Холла (Shokley-Read-Hall) (SRH) в солнечном элементе на основе кремния в виде параллелепипеда (а) и треугольной призмы (б) с равными активными поверхностями. Для обоих элементов распределение рекомбинации оказалось практически одинаковым по слоям. Распределение описывает количество рекомбинации в базовой области, поскольку доля рекомбинации Шокли-Рид-Холла (Shokley-Read-Hall) (SRH) в базовой области больше, чем доля рекомбинации Оже. Когда входная концентрация превышает критическое значение, рекомбинация СРГ не увеличивается, но количество оже-рекомбинации резко возрастает. Поэтому доля оже-рекомбинации в эмиттерном домене и рекомбинации СРГ в базовом домене будет велика.



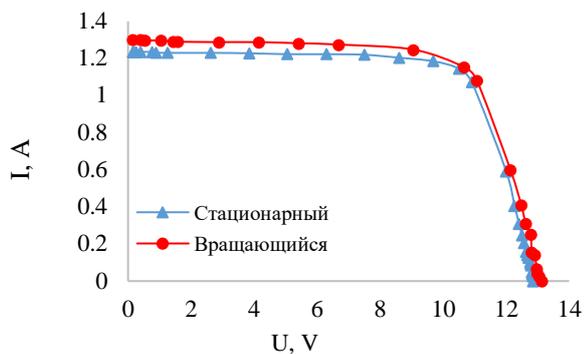
**Рис. 13.** Распределение величины рекомбинации Шокли-Рида-Холла (Shokley-Read-Hall) в СЭ на основе кремния в виде параллелепипеда (а) и треугольной призмы (б) с равными активными поверхностями [единица измерения:  $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ ]



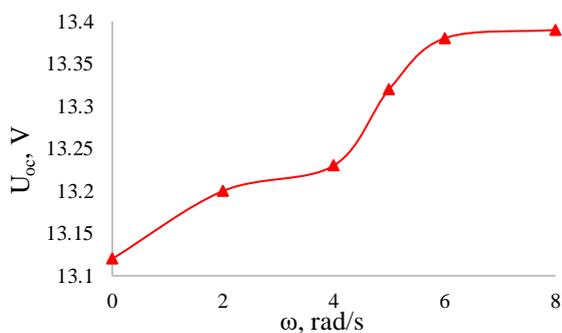
**Рис. 14.** Вольт-амперные характеристики СЭ из кремния в виде параллелепипеда (а) с одинаковой площадью фронтальных поверхностей, полученные расчетным путем



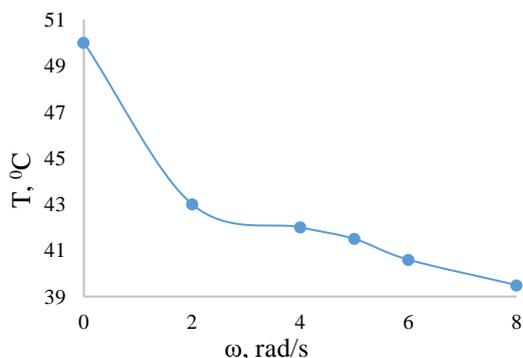
**Рис. 15.** Вольт-амперные характеристики СЭ из кремния в виде треугольной призмы (б) с одинаковой площадью фронтальных поверхностей, полученные расчетным путем



**Рис. 16.** Вольт-амперные характеристики призматической трехмерной фотоэлектрической электростанции в стационарном и вращающемся состояниях, образованной последовательным соединением 24 СЭ на кремниевой основе размером  $56 \times 56 \text{ мм}^2$



**Рис. 17.** Зависимость рабочего напряжения и от угловой скорости устройства на призматическом 3D устройстве, образованном последовательным соединением 24 кремниевых СЭ размерами  $56 \times 56 \text{ мм}^2$ .



**Рис. 18.** Зависимость температуры поверхности от угловой скорости устройства на призматическом 3D устройстве, образованном последовательным соединением 24 кремниевых СЭ размерами  $56 \times 56 \text{ мм}^2$

Установлено, что при вращении прибора его фотоэлектрические параметры улучшаются. Поэтому была исследована зависимость его фотоэлектрических параметров от скорости вращения. Поэтому на рис. 17 изображена зависимость рабочего напряжения и на рис. 18 температуры поверхности от угловой скорости устройства.

Температура поверхности устройства составляла  $50^\circ\text{C}$  без вращения, а рабочее напряжение составляло  $13,12 \text{ В}$ . В диапазоне  $0-6 \text{ рад/с}$  скорости вращения рабочее напряжение прибора резко возросло на  $0,36 \text{ В}$ , а температура поверхности уменьшилась на  $9,4^\circ\text{C}$ . В диапазоне  $6-8 \text{ рад/с}$  рабочее напряжение несколько увеличилось на  $0,01 \text{ В}$ , а температура соответственно уменьшилась на  $1,1^\circ\text{C}$ . Это означает, что с увеличением скорости вращения фотоэлектрического устройства его напряжение холостого хода асимптотически возрастает до определенного значения, а температура поверхности асимптотически уменьшается близко к температуре окружающей среды, но не может быть ниже температуры окружающей среды. Следовательно, использование этого метода может предотвратить, перегрев поверхности фотоэлектрического устройства, но не может охладить ее до низких температур.

Таким образом, экспериментальные исследования треугольных и прямоугольных солнечных элементов на основе моно- и поликристаллического кремния показали, что фотоэлектрические параметры соединения лучше, когда СЭ на основе монокристаллического кремния имеет треугольную форму, а СЭ на основе поликристаллического кремния - прямоугольную форму. Поэтому было предложено использование прямоугольных СЭ на основе монокристаллического кремния при изготовлении фотоэлектрических устройств призматической формы и СЭ на основе монокристаллического кремния треугольной формы при изготовлении фотоэлектрических устройств пирамидальной формы. Даже при моделировании треугольного и прямоугольного СЭ на основе монокристаллического кремния в Sentaurus TCAD было обнаружено, что фотоэлектрические параметры треугольного СЭ были лучше, а эффективность выше. То есть результаты, полученные при моделировании, соответствовали экспериментальным результатам.

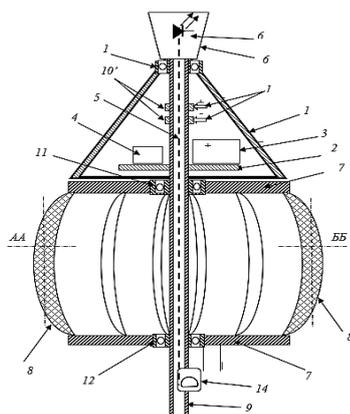
В четвертой главе «**Разработка и характеристики фотоэлектрических модулей 3D формата с кремниевыми солнечными элементами**» приведены результаты разработки и характеристики фотоэлектрических модулей пирамидальной и призматической конструкции с кремниевыми солнечными элементами. Проанализированы особенности испытания фотоэлектрического модуля 3D формата и технико-экономические показатели их внедрения.

Предложенная конструкция содержит вращающуюся солнечную панель, установленную на свободно вращающемся дополнительном механизме, состоящем из верхнего и нижнего дисков, причем между дисками вмонтированы по периметру неподвижные ветровые лопасти аэродинамической формы. Солнечная панель выполнена в виде прямой (сеченной) многогранной пирамиды. Фотоэлектрический модуль снабжен аккумулятором и контроллером, установленными на неподвижном дисковом основании, закрепленном на неподвижной стойке (вертикальной оси), под солнечной панелью с выходом питания для внешнего потребления энергии. Фотоэлектрический модуль снабжен светильником, вмонтированным в неподвижную стойку выше солнечной панели.

Лабораторный образец солнечной панели в виде правильной восьмигранной пирамиды устройства фотоэлектрического модуля имеет следующие размеры: высота пирамиды равна  $H=39$  см, основание в виде многогранника (восьмигранник) с периметром, равным  $P=135$  см, угол наклона панели равен 60 град. Внешняя поверхность пирамиды с основанием в виде восьмигранника состоит из 8 треугольников и определяется формулой:

$$S = 8 (1/2) P h = 4 P h \quad (50)$$

Длина основания треугольника составляет 16,9 см, апофема равна  $h=40$  см. Внешняя площадь солнечной панели составляет  $S=2652$  см<sup>2</sup>. При однократной солнечной освещенности устройство без вращения вырабатывает электрическую энергию мощностью почти 10 Вт.



**Рис. 19.** Разрез по вертикали разработанного фотоэлектрического модуля с пирамидо-образной архитектурой

Механизм вращения (ветряное колесо) содержит верхний и нижний диски с множественными отверстиями, аэродинамические лопасти, прикрепленные вертикально между двумя дисками по периметру. Диски имеют радиус кривизны 22 см, высота лопастей 40 см, ширина лопасти в середине 6 см, количество лопастей 8 шт. При помощи домашнего вентилятора изготовленное ветряное колесо вращалось с частотой 20 вращений в минуту. Определены выходная мощность фотоэлектрического модуля и вырабатываемая им энергия по результатам измерения электрических параметров с и без вращения при освещении однократным солнечным излучением. Результаты лабораторного испытания приведены в таблице 1.

Таблица 1

Некоторые параметры фотоэлектрического модуля с и без вращения

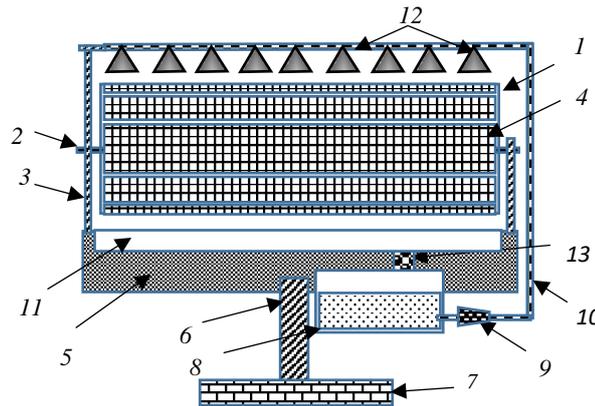
№	Условие эксперимента	В начале эксперимента		В течении времени (4 час)	
		Средняя мощность, Вт	Вырабат. энергия, Вт×ч	Средняя мощность, Вт	Вырабат. энергия, Вт×ч
1	Плоский ФМ, $S=2652 \text{ см}^2$	12	12	7,8	31,2
2	Пирамидальный ФМ, $S = 2652 \text{ см}^2$ без вращения	10	10	7	28
3	Пирамидальный ФМ, $S = 2652 \text{ см}^2$ и с вращением частотой $20 \text{ мин}^{-1}$	15	15	15	60

Из результатов измерения следует, что фотоэлектрический модуль с солнечными панелями, выполненными в виде прямой многогранной пирамиды вырабатывает почти в 2 раза больше электрической энергии, чем плоская солнечная панель с такой же площадью.

Разработана конструкция вращающегося фотоэлектрического модуля, которая содержит солнечную панель в виде цилиндра или моногранной призмы с полупроводниковыми солнечными элементами, свободно вращающимися вокруг горизонтальной оси, механизм вращения, неподвижное основание, электромагнитные катушки, постоянные магниты и соединительные провода. Устройство содержит электромагнитные катушки, соединенные в виде нагрузки к солнечной батарее, причем, электромагнитная катушка наиболее освещенной плоской стороны призмы с солнечными панелями расположена в поле постоянного магнита, закрепленного на внутренней неподвижной части устройства. Устройство также содержит

систему водяной очистки внешней поверхности солнечных панелей, причем система очистки работает за счет части фотоэлектрической энергии вырабатываемой самим устройством. Для повышения надежности и эффективности устройства система очистки снабжена ёмкостью чистой воды, водосборником, электронасосом, фильтром, трубопроводом с брызгающими отверстиями.

Многранная призма имеет внешнюю поверхность в виде многих прямоугольников, причем длина прямоугольника равна на целое число квадратных солнечных элементов  $L = n \times a$ , а ширина прямоугольника равна длине стороны квадратного солнечного элемента  $l = a$ , где  $n$  - целое число  $a$  – длина стороны квадратного солнечного элемента.



**Рис. 20.** Разрез по вертикали разработанного фотоэлектрического модуля с призма-образной архитектурой

Таблица 2

Геометрические размеры и некоторые выходные фотоэлектрические параметры солнечного фотоэлектрического устройства, полученные при натуральных испытаниях

№	Тип устройства	Габариты, см <sup>3</sup>	Исходное $I_{кз}$ , А	Исходное $U_{хх}$ , В	W/КПД, Вт/% ( $\Delta t=0$ ч.)	W/КПД, Вт/% ( $\Delta t=1$ ч.)	W/КПД, Вт/% ( $\Delta t=2$ ч.)	W/КПД, Вт/% ( $\Delta t=4$ ч.)
1	Пример 1.	90×186×65	2,2	24	52,8/16	52,8/16	52,8/16	52,8/16
2	Пример 2.	55×135×48	3,4	24	81,6/16	81,6/16	81,6/16	81,6/16
3	Плоская батарея	300×12,5×0,5	2,9	24	69,9/16	58/15	46,4/14	34,8/10

Геометрические размеры и основные выходные фотоэлектрические параметры солнечного фотоэлектрического устройства в сравнении с контрольной плоской солнечной батареей, полученные при натуральных испытаниях, приведены в таблице 2.

Результаты выполнения примеров и контрольной плоской солнечной батареи, полученные при натуральных испытаниях, свидетельствуют о том, что солнечное фотоэлектрическое энергетическое устройство, изготовленное по предложенной конструкции (ряд 1 в таблице 2) имеет достаточно стабильные значения вырабатываемой мощности и КПД при длительной эксплуатации. При этом можно увидеть, что плоская солнечная батарея (конструкция прототипа, ряд 3 в таблице 2) имеет нестабильные значения вырабатываемой мощности и КПД.

Одной из актуальных проблем использования фотоэлектрических устройств является негативное влияние на них жаркого климата. Для решения вышеуказанных проблем было предложено вращающееся фотоэлектрическое энергетическое устройство нового формата 3D. Принцип работы устройства основан на самоохлаждении. Наши эксперименты на этом устройстве показали, что даже после 1 часа работы температура поверхности солнечной панели не изменилась, никакого снижения КПД и выходного напряжения не наблюдалось. Это потому, что в нем формируется «принудительная конвекция». То есть традиционные солнечные панели не успевают излучать тепловую энергию, которую они поглощают, в окружающую среду и вызывают нагрев поверхности. Однако в предлагаемой конструкции, помимо теплового излучения, также наблюдаются потери тепла за счет принудительной конвекции, что предотвращает возникновение перепадов температуры с окружающей средой и становится причиной самоохлаждения.

Таблица 3

Результаты экспериментов на традиционных солнечных панелях

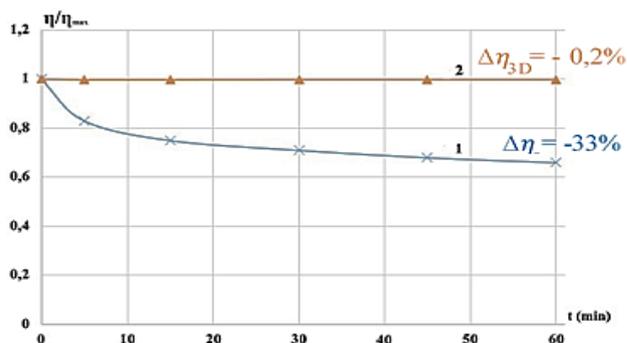
$t$ (min)	0	5	15	30	45	60
$T$ (°C)	33	35	38	42	48	52
$U$ (V)	24	20	18	17	16.3	16
$\eta$ (%)	21	17.5	15.75	14.875	14.26	14

Таблица 4

Результаты экспериментов, проведенных на новом 3D формате вращающегося фотоэлектрического энергетического устройства

$t$ (min)	0	5	15	30	45	60
$T$ (°C)	33	33.2	33.2	33.1	33.1	33.1
$U$ (V)	13.3	13.27	13.27	13.28	13.28	13.28
$\eta$ (%)	21	20.95	20.95	20.97	20.97	20.97

В таблицах:  $t$  время эксперимента,  $T$  температура поверхности солнечной панели,  $U$  напряжение х. х. солнечной панели,  $\eta$  (КПД) эффективность солнечной панели. Подводя итоги эксперимента, можно сказать, что температура поверхности обычных плоских солнечных панелей со временем увеличивается, что приводит к снижению их КПД и уменьшению выходного напряжения. В предлагаемом новом формате 3D вращающегося фотоэлектрического энергетического устройства не изменяется температура его поверхности из-за самоохлаждения с течением времени, что гарантирует неизменное КПД фотоэлектрического устройства и выходное напряжение  $U$  (рис. 21). В регионах с высокой температурой окружающей среды рекомендуется использовать предлагаемое нами устройство.



**Рис. 21.** Зависимости эффективности разработанного фотоэлектрического модуля с пирамида-образной архитектурой от времени освещения солнечным светом

Таблица 5

Результаты испытания разработанного фотоэлектрического модуля с пирамида-образной архитектурой

№	Тип солнечного модуля	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{ср}}, \text{ мВт/см}^2$	КПД, %				
				$t=0$	$t=0,5 \text{ ч}$	$t=1,0 \text{ ч}$	$t=2,0 \text{ ч}$	$t=4 \text{ ч}$
1	Плоский	70	16,8	18	12,6	11,7	11,2	10,7
2	3D без вращения	66	16,8	18	12,6	11,7	11,2	10,7
3	3D с вращением	38	23,7	18	18	18	18	18
4	3D с вращением + КСИ	40	24,3	18,6	18,4	18,3	18,3	18,2

Сопоставление значений КПД фотоэлектрического модуля 3D формата (2-, 3-, 4-ряды) и плоской панели (1-ряд) свидетельствует о том, что вращающийся фотоэлектрический модуль 3D формата сохраняет свою высокую эффективность в течение длительного времени испытания. При этом эффективность плоского СП и не вращающегося фотоэлектрического модуля 3D формата уменьшаются от 18 % до 10,7 %. По данным колонки 4 табл. 5 можно вычислить, что количество получаемой фотоэлектрической энергии с единицы площади вращающегося модуля за час на 40 % больше, чем плоская солнечная панель.

С учетом современных данных по стоимости комплектующих деталей и материалов, использованных в таблице 5 энергетических устройств определена их энергетическая эффективность и срок окупаемости. Результаты приведены в таблице 6.

Таблица 6.

Энергетическая эффективность и срок окупаемости исследованных фотоэлектрических модулей

№	Тип солнечного модуля	$P_{\text{ср}}, \text{ мВт/см}^2$	Средняя годовая энергия, $\text{кВт} \times \text{ч}$	Финансовый эквивалент, тыс. сум	Относительная эффективность, %	Средняя стоимость и ее прирост $\$/\%$	Срок окупаемости, лет
1	Плоский СБ	16,8	100,8	100,8	100	90	10,7
2	3D без вращения	16,8	100,8	100,8	100	96 / 1,06	11,4
3	3D с вращением	23,7	142,5	142,5	142,5	99 / 1,1	8,3
4	3D с вращением+КСИ	24,3	146,1	146,1	146,1	105/1,16	8,6

Таким образом, определены технико-экономические характеристики внедрения фотоэлектрических модулей 3D формата с кремниевыми солнечными элементами. Относительная эффективность разработанного фотоэлектрического модуля 3D формата (ряд 3) с вращением за счет энергии ветра составляет на 42,5 % больше, чем плоская СБ. Использование концентратора для таких энергетических установок (ряд 4) позволяет увеличить их эффективность на 46,1 %. При этом средняя стоимость разработанного фотоэлектрического модуля 3D формата (ряд 3) с вращением на 10 % выше, чем плоская СБ. Стоимость установки с концентратором (ряд 4) на 16 % выше, чем плоская СБ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью современного цифрового аппаратно-технологического моделирования и экспериментального анализа всесторонне изучено фотоэлектрические энергетические устройства в 3D формате на основе кремниевых солнечных элементов, выявлен ряд их новых свойств, предложены и разработаны технические решения, направленные на их совершенствование, и были сформированы следующие основные научные выводы:

1. Предложена и научно обоснована концепция создания гибридной солнечной и ветряной энергетической установки, в которой механическая энергия ветра служит для охлаждения фотоэлектрического модуля в дневное солнечное время и для генерации электрической энергии ночью.

2. Разработано и запатентовано как полезный модель, фотоэлектрическое энергетическое устройство 3D формата, пирамидальной конструкции с кремниевыми солнечными элементами и вращающейся системой лопастей аэродинамической формы (Патент РУз № FAP01804, 24.01.2022 г., заявка № FAP 2020 0014; 27.01.2020 г. Официальный бюллетень № 2, 2022).

3. Подготовлены опытные образцы фотоэлектрических энергетических устройств 3D формата пирамидальной и призматической конструкций с кремниевыми солнечными элементами. Определено, что при угловой скорости вращения 6-8 рад/с температура поверхности фотоэлектрического модуля снижается до 1,3-1,87 °C/мин, а рабочее напряжение холостого хода увеличивается до 0,1-0,27 В.

4. Определены оптимальные конструктивные параметры фотоэлектрических энергетических устройств 3D формата в форме пирамиды с вертикальной осью: верхний радиус  $0,07 < r_1 < 0,14$  м, нижний радиус  $0,35 < r_2 < 0,45$  м, высота  $0,32 < h < 0,4$  м. При этом установлено что, по сравнению с солнечной панелью с плоской поверхностью эффективность такой солнечной панели повышается на 42,5%, а при использовании концентрирующего метода на 46,1%. Это происходит за счет того, что солнечный свет падает на ее поверхность больше по времени и предотвращено нагрев поверхности.

5. Разработана опытная микро-энергетическая установка с призматическим фотоэлектрическим модулем и линзой Френеля в виде промышленного образца с обеспечением концентрации солнечного излучения  $20 \div 50$  крат.

6. Разработан и внедрен старт-ап проект – промышленный образец фотоэлектрического модуля 3D формата с промышленными кремниевыми солнечными панелями. Общие габариты:  $1600 \times 1600 \times 1300$  мм. Выходные параметры:  $I_{кз}=5$  А,  $U_{хх}=24$  В,  $KПД = 16 \div 18$  %.

7. Влияние геометрической формы солнечных элементов на их эффективность научно обосновано характером рекомбинационных потерь фотогенерированных неравновесных носителей заряда по периметрическим боковым поверхностям кремниевых пластин. Использование треугольных

монокристаллических солнечных элементов для фотоэлектрического устройства пирамидальной формы привело к дополнительному увеличению выходной мощности до 4%, а использование прямоугольных поликристаллических солнечных элементов для фотоэлектрического устройства призматической формы привело к дополнительному увеличению выходной мощности на 10%.

8. Разработана цифровая модель фотоэлектрических энергетических устройств формата 3D призматично-пирамидальной структуры с кремниевыми солнечными элементами, научно обоснована связь между ее кинематическими и фотоэлектрическими характеристиками. Данная разработка прошла государственную регистрацию как новый программный продукт (Удостоверение № DGU 09198 программного продукта для ЭВМ: “ST Vertical”).

**SCIENTIFIC COUNCIL PHD.03/27.02.2020.T.106.02  
ON AWARD OF PHYLOSOFY DOCTOR DEGREE AT THE FERGHANA  
POLYTECHNIC INSTITUTE**

---

**ANDIJAN STATE UNIVERSITY**

**MIRZAALIMOV NAVRUZBEK ALISHER UGLI**

**DEVELOPMENT OF 3D FORMAT PHOTOELECTRIC MODULES WITH  
SILICON SOLAR CELLS**

**05.05.06 – Power-plants on the basis of renewable energy**

**DISSERTATION ABSTRACT  
of the doctor of philosophy (PhD) on TECHNICAL SCIENCES**

**Ferghana – 2023**

The theme of dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under № B2022.4.PhD/T3329

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Andijan state university.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of Scientific Council at [www.ferpi.uz](http://www.ferpi.uz) and on the website of «Ziyonet» informational and educational portal at [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz).

**Scientific supervisor:**

**Aliev Rayimjon**  
doctor of technical sciences, professor

**Official opponents:**

**L.K.Mamadaliyeva**  
doctor of technical sciences, professor

**I.A.Yuldashev**  
doctor of technical sciences, professor

**Leading organization:**

Qarshi State University

The defense of the dissertation will take place at the meeting of the Scientific Council for the award of the scientific degree of Doctor of Philosophy PhD.03/27.02.2020.T.106.02 of the Ferghana Polytechnic Institute in 2023 at 29 december hours 14:00. Address: 150107, Uzbekistan, Ferghana, 86 Ferghana Str., Tel: (+99873) 241-13-03, (99873) 241-12-06; e-mail: [uzferfizika@mail.ru](mailto:uzferfizika@mail.ru).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the scientific and methodological department of the Information-Resource Centre of the Ferghana Polytechnic Institute (registered under No. 194) Address: 150107, Uzbekistan, Ferghana, 86 Ferghana str. Tel: (+99873) 241-13-03.

The abstract of the dissertation was distributed on «14» december 2023  
(Registry record No. 4 dated «14» december 2023)



**S.F.Ergashev**  
Chairman of Scientific Council on award of  
Scientific degrees, DSc, professor

**B.A.Abdukarimov**  
Scientific secretary of scientific council  
on award of doctor philosophy, PhD, docent

**A.A.Quchqarov**  
Chairman of Scientific Seminar under scientific  
council on award of scientific degrees, PhD, docent

## INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

**The aim of the research work** is digital modeling and experimental development of a 3D photovoltaic module with silicon solar cells.

**The object of investigation** physical, technical and energy characteristics of digitally modeled and experimentally created designs of silicon solar photovoltaic power plants in 3D format.

**The scientific novelty of the research** consists the following:

- it has been determined that, based on optimization of design parameters and digital modeling taking into account photovoltaic indicators, a 3D photovoltaic energy device with a pyramidal structure is 42.5% more efficient than a flat solar panel;

- it was determined that the influence of the geometric shape of solar cells on their efficiency, taking into account the recombination losses of photogenerated nonequilibrium charge carriers along the perimetric faces of silicon wafers, when using triangular monocrystalline solar cells for a photovoltaic energy device of a pyramidal design, led to an additional increase in output power up to 4%;

- a method has been developed to reduce the temperature of its surface by ensuring the difference between the energy of light incident on the surface of the solar cell and the energy of thermal radiation emanating from this surface;

- a design of a hybrid solar-wind device has been developed that allows for a continuous supply of electricity, taking into account the vertical arrangement of a 3D format photovoltaic energy device with a pyramidal design.

### **Implementation of research results.**

Based on the results obtained on photovoltaic conversion of solar energy based on the technology of digital modeling of silicon photovoltaic solar energy devices in 3D format and the physical processes of experimentally created structures:

- a 3D format photovoltaic energy device (FAP 01804 dated January 24, 2022) based on a silicon solar cell was introduced (Uzeltehsanoat Certificate No. 04-3/1377 dated June 3, 2022). As a result, the efficiency of photovoltaic energy devices consisting of silicon-based solar cells in production environments has been optimized and improved;

- Foton JSC has introduced solar cells based on mono- and polycrystalline silicon of triangular and rectangular shapes with equal surfaces into production (certificate No. 04-3/1377 dated June 3, 2022). The result was a 4% higher power output when the monocrystalline silicon solar cell was cut in a triangular shape, and a 10% higher power output when the polycrystalline silicon solar cell was cut in a rectangular shape.

**The structure and volume of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, list of used literature from 116 titles and appendices. The volume of the dissertation is 111 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I. бўлим (I Часть; I Part)**

[1]. Р.Алиев, Н.Мирзаалимов, Ж.Зиёитдинов, С.Алиев Фотоэлектрик модуль. Патент РУз № FAP 01804 от 24.01.2022.

[2]. Р.Алиев, Н.А.Мирзаалимов, А.А.Мирзаалимов Айланувчи янги 3D форматли фотоэлектрик энергетик курилманинг назарий ва техник асослари // ФарПИ Илмий-техника журнали. С. 117-123. (ФарПИ ИТЖ 2022, Т.26, №4, №20).

[3]. J. Gulomov, R. Aliev, N. Mirzaalimov, B. Rashidov, J. Alieva Study of Mono- and Polycrystalline Silicon Solar Cells with Various Shapes for Photovoltaic Device with 3D Format: Experiment and Simulation // Journal of Nano- and Electronic Physics. Volume 14 (2022 Year), No.5, pp. 05012-1 - 05012-8. [№3 Scopus, №25 DOAJ, №41 SCImago]

[4]. Б. Урманов, Ж. Гулямов, Р. Алиев, Н. Мирзаалимов Влияние формы и размеров пластин на фотоэлектрические характеристики кремниевых р-п-структур // Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research, Vol. 4 Iss. Engineering physics.1, 2022, С. 46-52. (Scientific Bulletin. Physical and Mathematical Research №13)

[5]. Р.Алиев, Н.Мирзаалимов Янги айланувчи 3D форматли фотоэлектрик энергетик курилмалардан фойдаланишнинг афзалликлари // НамДУ илмий ахборотномаси. 2021 йил 12-сон, С. 40-44. (Наманган давлат университети илмий ахборотномаси №14).

[6]. Н.А.Мирзаалимов, Р.Алиев Разработка и характеристики фотоэлектрических модулей 3D формата на основе кремниевых солнечных элементов, вращающихся вокруг вертикальной и горизонтальной осей ҚарДУ хабарлари, илмий-назарий услубий журнали. 2023 йил 1-сон. С. 4-11. (Қарши давлат университети илмий хабарномаси №38).

[7]. N. Mirzaalimov, R. Aliev, A. Mirzaalimov Study of monocrystalline and polycrystalline silicon solar cells with various shapes for photovoltaic device with 3D format // Scientific and technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology. Volume 7, Issue 4 (2022 Year), No.5, pp.201-213. (Наманган муҳандислик-технология институти илмий-техника журнали №33)

[8]. J.Gulomov, R.Aliev, A.Mirzaalimov, N.Mirzaalimov, J.Kakhkhorov, B.Rashidov Mathematical model of a rotary 3D format photoelectric energy device // World Journal of Advanced Research and Reviews. India. 2020, 08(02), pp. 164–172. [№12 Index Copernicus, №16 Directory Indexing of International Research Journals-CiteFactor, №35 CrossRef].

[9]. А.А.Мирзаалимов, Н.А.Мирзаалимов, Ж.Ж.Гуломов Преимущества использования нового вращающегося фотоэлектрического энергетического устройства 3D формата // Universum: Технические науки. Научный журнал. Российская Федерация, Москва, 2020, 6(75), 3-часть. С. 84-

86. [№12 Index Copernicus, №16 Directory Indexing of International Research Journals-CiteFactor, №16 Ulrich's Periodicals Directory, №35 CrossRef].

[10]. М.К.Абдувохидов А.А.Мирзаалимов, Н.А.Мирзаалимов, Ж.Ж.Гуломов, Температурное влияние потенциального барьера в солнечных элементах кремния // Universum: Технические науки. Научный журнал. Российская Федерация, Москва, 2020, 6(75), 3-часть. С. 80-83. [№12 Index Copernicus, №16 Directory Indexing of International Research Journals-CiteFactor, №16 Ulrich's Periodicals Directory, №35 CrossRef].

[11]. Мирзаалимов Н.А. Янги айланувчи 3D форматли фотоэлектрик энергетик курилмалардан фойдаланишнинг афзалликлари // “Тенденции развития современной физики полупроводников: Проблемы, достижения и перспективы” Сборник материалов международной онлайн конференции. 28 мая 2020 г. С.185-188. [www.e-science.uz](http://www.e-science.uz).

## II. бўлим (II-часть; II part)

[12]. А.Мирзаалимов, Ж.Гуломов, Р.Алиев, М.Абдувохидов, Н.Мирзаалимов, Ж.Зиётдинов “ST VERTICAL” физик тажрибаларнинг виртуал моделлари. Ўзбекистон Республикаси Адлия вазирлиги хузуридаги Интеллектуал мулк агентлиги, Гувоҳнома № DGU 09198.

[13]. R.Aliev, M.Abduvoxidov, N.Mirzaalimov, J.G'ulomov Kremniy asosli quyosh elementlarida rekombinatsiya va generatsiya jarayoni // Science and education. Volume 1, Issue 2, May 2020 yil. B. 230-235.

[14]. A.Mirzaalimov, J.Gulomov, R.Aliev, N.Mirzaalimov, S.Aliev A study of Silicon p-n-structures with Mono and Multifacial photosensitive surfaces // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 25-32. doi:10.17586/2226-1494-2021-21-5-774-784.

[15]. A.Mirzaalimov, R.Aliev, N.Mirzaalimov, J.Gulomov Simulation photoelectric parameters of vertical junction solar cells // International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. Volume 10, No.2, March - April 2021. pp. 543-548.

[16]. J.Gulomov, R.Aliev, A.Mirzaalimov, N.Mirzaalimov Exploring optical properties of solar cells by programming and modeling // Global Journal of Engineering and Technology Advances 2020, 05(01), pp. 32–38.

[17]. J.Gulomov, R.Aliev, A.Mirzaalimov, N.Mirzaalimov, J.Kakhkhorov, B.Rashidov and S.Temirov Studying the Effect of Light Incidence Angle on Photoelectric Parameters of Solar Cells by Simulation // International Journal of Renewable Energy Development, 10(4), pp. 2021, 731-736.

[18]. Н.Мирзаалимов, Р.Алиев, А.Мирзаалимов Усовершенствование оптической эффективности кремниевых фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии // Сборник тезисов докладов V Международной научной конференции «Оптические и фотоэлектрические явления в

полупроводниковых микро- и наноструктурах». 13-14 ноября, 2020 г., ФерПИ, Фергана, С. 159-163.

[19]. М.К.Абдувохидов, А.А.Мирзаалимов, Н.А.Мирзаалимов, Ж.Н.Зиёитдинов, С.И.Жўраева, Б.Жўрабоев “Қуёш-шамол” гибрид энергетик қурилмалари // Наманган муҳандислик–қурилиш институти, “Энергетика соҳасини ривожлантиришда муқобил энергия манбаларининг роли” НамМҚИ, 24 апрель 2021 йил, Наманган, С. 269-272.

[20]. Н.Мирзаалимов, Р.Алиев, Ж.Ғуломов Паст температурали фотоэлектрик қурилмаларни ишлаш принципининг конструкцион ва физик асослари // Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти Ўзбекистон физик-талабалари ва ёш олимлар ассоциацияси, Ёш олимлар ва физик талабаларнинг I Республика илмий анжумани (ЕОФТРИА-I) Тошкент, 2021 йил, 21апрель, С. 164-165.

[21]. N.Mirzaalimov, J.G'ulomov Vertikal o'qli aylanuvchi fotoelektrik energetik qurilmaning xarakteristikalarini // Академик С.З.Зайнабидиновнинг 75 йиллик таваллудига бағишланган “Замонавий микроэлектрониканинг ривожланишида фан, таълим ва инновация интеграцияси” Республика илмий-услубий анжумани материаллари. Андижон 2020 йил, 24-25 декабрь. С. 337-338.

[22]. N.Mirzaalimov, J.Qahhorov, A.Mirzaalimov Aylanuvchi 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmaning nazariy va texnik asoslari // “Яримўтказгичли микроэлектроника, нанотехнологиялар ва ноанъанавий энергия манбалари физикасининг долзарб муаммолари” Андижон давлат университети. Андижон 2021-йил, 7-8-октябрь. С. 115-117.

[23]. Kremniyli quyosh elementlari asosidagi 3D formatli fotoelektrik modullarni ishlab chiqish va ularning xarakteristikalarini taxlil qilish // Energiyadagi perspektivalar va muammolarning zamonaviy yechimlari xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. Namangan 2022, С. 420-425.

[24]. Mirzaalimov N.A.\*, Mirzaalimov A.A., Qahhorov J., Abdumannopova M. 3D formatli fotoelektrik energetik qurilmaning xarakteristikalarini // Energiyadagi perspektivalar va muammolarning zamonaviy yechimlari xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. Namangan 2022, С. 425-427.

[25]. Каххоров Жамшидбек, Мирзаалимов Наврузбек Влияние на энергию стеклянного покрытия на поверхности солнечных панелей // відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті, Матеріали ХХІІ Міжнародної науково-практичної конференції. Київ 2022. С.136-138.