

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ  
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**СОДИҚОВ ТИМУР БАХТИЁРОВИЧ**

**ФОТОЭЛЕКТРИК МОДУЛЛАРНИНГ ОПТИК ЮЗАСИНИ ЧАНГДАН  
ТОЗАЛАШ ҚУРИЛМАСИНИ ТАКОМИЛЛАШТИРИШ**

**05.05.06 – Қайта тикланадиган энергия турлари асосидаги энергия қурилмалари**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2025**

**Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)**

**Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)**

**Содиқов Тимур Бахтиёрович**

Фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозалаш  
қурилмасини такомиллаштириш..... 3

**Содиқов Тимур Бахтиёрович**

Усовершенствование устройства очистки оптической поверхности  
фотоэлектрических модулей от пыли..... 23

**Sodiqov Timur Bakhtiyorovich**

Improvement of a device for cleaning the optical surface of photovoltaic  
modules from dust..... 43

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works ..... 46

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА  
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ  
DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ  
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

**СОДИҚОВ ТИМУР БАХТИЁРОВИЧ**

**ФОТОЭЛЕКТРИК МОДУЛЛАРНИНГ ОПТИК ЮЗАСИНИ ЧАНГДАН  
ТОЗАЛАШ ҚУРИЛМАСИНИ ТАКОМИЛЛАШТИРИШ**

**05.05.06 – Қайта тикланадиган энергия турлари асосидаги энергия қурилмалари**

**ТЕХНИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)  
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2025**



## КИРИШ (докторлик (PhD) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Жаҳонда глобал иқлим ўзгаришини ҳисобга олган ҳолда фотоэлектрик модулларнинг энергия самарадорлигини, яроқлилиқ муддатини, эксплуатация қулайлигини ошириш ҳамда ўзини оқлаш муддатини камайтириш ва улардан самарали фойдаланиш мақсадида турли хил қурилмаларни ишлаб чиқиш масалаларига алоҳида аҳамият берилмоқда. Ҳозирги кунда ривожланган мамлакатларда «... фотоэлектрик модулларнинг чиқиш қуввати уларнинг оптик юзасини чангланганлик даражасига қараб 50 % гача камайиши экспериментал тадқиқ қилинган...»<sup>1</sup>. Бу борада, жумладан фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозаловчи конструкция ва қурилмаларни ишлаб чиқиш, такомиллаштириш, қуллаш ҳамда тозалаш жараёнини моделлаштириш асосида энергия самарадорлигини оширишга алоҳида эътибор қаратилмоқда.

Жаҳонда фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозаловчи автоматлаштирилган қурилма, конструкция, интеллектуаллашган робот, турли хил шаффоф қоплама ва усулларни ишлаб чиқиш, такомиллаштириш, қуллаш ҳамда тозалаш жараёнини математик моделлаштиришга қаратилган илмий тадқиқотлар олиб борилмоқда. Ушбу йўналишда, жумладан эксплуатация қулайлиги даражаси юқори бўлган турли хил конструкция, қурилма ва усулларни ишлаб чиқиш, такомиллаштириш ҳамда моделлаштириш бўйича тадқиқотлар устивор ҳисобланади. Шу билан бирга, фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозаловчи арзон, автоматлаштирилган, тез ишловчи, маҳаллий хом-ашёдан ташкил топган ва импорт ўрнини босувчи қурилма, шунингдек тозалаш вақтини қисқартиришга имкон берувчи алгоритм ва дастурларни ишлаб чиқиш долзарб вазифалардан ҳисобланади.

Республикамизда иқтисодиёт тармоқлари кесимида энергия сиғимдорлигини 2030 йилга қадар бир ярим баробарга камайтириш мақсадида янги технологик ечимларни яратиш ва такомиллаштириш ҳамда жорий этишга доир кенг кўламли чора-тадбирлар амалга оширилмоқда. 2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегиясида, жумладан «Иқтисодиётни электр энергияси билан узлуксиз таъминлаш ҳамда «Яшил иқтисодиёт» технологияларини барча соҳаларга фаол жорий этиш, иқтисодиётнинг энергия самарадорлигини 20 %га ошириш»<sup>2</sup> бўйича вазифалар белгиланган. Ушбу вазифаларни амалга оширишда, фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозалаш учун арзон қурилмаларни ишлаб чиқиш, такомиллаштириш, яратиш ва математик моделлаштириш, шунингдек тозалаш вақтини қисқартириш учун алгоритм ва дастурларни ишлаб чиқиш масалаларини ечишга қаратилган илмий-тадқиқот ишларини олиб бориш муҳим ҳисобланади.

<sup>1</sup>Mohamed J.A., Syed A.M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules // Renewable energy, 2013, Vol.60, pp.633-636. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014>

<sup>2</sup>Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони <https://lex.uz/docs/5841077>

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон «2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2024 йил 7 августдаги ЎРҚ-940 сонли «Энергияни тежаш, ундан оқилона фойдаланиш ва энергия самарадорлигини ошириш тўғрисида»ги Қонуни, 2023 йил 16 февралдаги ПК-57 сонли «2023-йилда қайта тикланувчи энергия манбаларини ва энергия тежовчи технологияларни жорий этишни жадаллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари, ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Диссертация иши бўйича тадқиқотлар республика фан ва технологиялари ривожланишининг IV. «Қайта тикланадиган энергия манбаларидан фойдаланиш усулларини ривожлантириш, нанотехнологиялар, фотоника ва бошқа замонавий илғор технологиялар асосида қурилмалар ва технологияларни яратиш» устувор йўналишига мос келади.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Фотоэлектрик станцияларидан фойдаланиш самарадорлигини ошириш, хусусан фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозалаш усуллари ва тозалаш жараёнининг математик моделлаштириш масалаларига қаратилган илмий тадқиқотлар дунёнинг кўплаб етакчи илмий-тадқиқот марказлари ва олий ўқув юртларида, хусусан: Hong Kong Polytechnic University (Хитой), University of Strasbourg (Франция), University of Sharjah (БАА), Sohar University (Уммон), Tokyo technology institute (Япония), Integral University (Хиндистон), Москва энергетика институти МЭИ (Россия), М.В.Ломоносов номидаги Москва давлат университети (Россия), Қатар атроф-муҳит ва энергетика илмий тадқиқот институти (Қатар), Тошкент давлат техника университети (Ўзбекистон), Фарғона политехника институти ва бошқаларда амалга оширилмоқда.

Фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозаловчи усул, такомиллашган ва соддалашган қурилма ва конструкцияларни ишлаб чиқиш, оптималлаштириш, яратиш ҳамда тозалаш жараёнини моделлаштириш каби масалаларни ҳал қилишда бир қатор таниқли хорижий олимлар катта ҳисса қўшганлар, жумладан J. Zijlstra, A.B. Ahmadullah, R. Gao, A.A. Abubakar, A.A. Sharafi, A. Абугхиятха, В.А. Заварухин, Д.И. Амиров, Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, Р.А. Нурғалиева, Ю.Н. Зацаринная ва бошқалар.

Тозалаш вақтини қисқартириш ҳамда фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозаловчи қурилма ва конструкцияларни ишлаб чиқиш, такомиллаштириш, яратиш, моделлаштириш каби илмий муаммоларни ҳал қилишга Ўзбекистоннинг таниқли олимларини илмий ишлари бағишланган. Булардан: Р.А. Захидов, Р.Р. Авезов, Р.А. Муминов, М.Н. Турсунов, Н.Р. Авезова, Н.А. Матчанов, В.Г. Дыскин, И.А. Юлдошев, Н.М. Захидов, Б.Е. Абдуллаев, С.Қ. Шоғучқаров, О.О. Холматов, З. Кенжаев. Олиб борилган илмий тадқиқотлар натижасида иқлим шароитларига қараб

фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини тозалаш режимларини оптималлаштириш масалаларини ечишда салмоқли натижаларга эришилди.

Сезиларли муваффақиятларга қарамай, фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозаловчи арзон, тез ҳаракат қилувчи, эксплуатация қулайлиги даражаси юқори бўлган қурилма ва конструкцияларни моделлаштириш, ишлаб чиқиш, такомиллаштириш ва яратиш билан боғлиқ илмий муаммолар етарли даражада ўрганилмаган.

Мазкур диссертация ишида фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозалаш учун зарур бўлган энергия сарфини аниқлашга ва сув сарфини оптималлаштиришга имкон берувчи математик моделни ишқаланиш коэффициентини ҳисобга олиб такомиллаштириш, фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозаловчи қурилмани энергия тежамкор электр двигатель ва электр механик тизим асосида такомиллаштириш, фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозалаш учун зарур бўлган вақт сарфини қисқартиришга имкон берувчи усул ва алгоритмни модул узунлигини ҳисобга олиб такомиллаштириш усуллари таклиф этилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** фотоэлектрик модулларнинг самарадорлигини уларнинг оптик юзасини чангдан тозаловчи қурилма конструкциясини такомиллаштириш ҳисобига ошириш.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

Фотоэлектрик модулларнинг оптик юзаларини чангдан тозалашда қулланиладиган мавжуд усуллар ва техник йечимларни таҳлил қилиш;

иқлим шароитларини ҳисобга олиб тозалаш қурилмасини конструктив элементларини танлаш ва асослаш;

фотоэлектрик модулнинг оптик юзасини тозалаш жараёнининг математик моделини такомиллаштириш;

тозалаш қурилмасини тажрибавий намунасини яратиш ва унинг қўлланилиши энергетик мақсадга мувофиқлигини ва самарадорлигини баҳолаш учун экспериментал тадқиқот ўтказиш;

такомиллаштирилган тозалаш қурилмасини техник-иқтисодий ва экологик баҳолаш.

**Тадқиқотнинг объекти** сифатида фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозалаш учун мўлжалланган техник йечим ва қурилмалар олинган.

**Тадқиқотнинг предмети** фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини тозаловчи жараёнлар ва усуллар самарадорлигини автоматлаштирилган электрмеханик тизим ёрдамида ошириш, шунингдек уларни такомиллаштириш ва иқлим шароитларига мослаштириш тамоиллари ташкил этади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тадқиқот жараёнида Рунге-Кутта, замонавий математик ҳисоблаш, тозалаш жараёнини моделлаштириш, ўлчаш ва қиёсий таҳлил қилиш усулларидан фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** қуйидагилардан иборат:

тозалаш қурилмасини тезлиги асосида ишқаланиш коэффициентини

ҳисобга олиб фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини тозалаш учун зарур бўлган энергия сарфини аниқлашга ва сув сарфини оптималлаштиришга имкон берувчи математик модел такомиллаштирилган;

электр механик тизим ва энергия тежамкор электр двигател асосида модул ўлчамларини ҳисобга олиб  $1,67 \text{ м}^2$  юзага эга бўлган фотоэлектрик модулни битта тозалаш циклини 24 секундда амалга ошириш натижасида фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини тозалаш қурилмаси такомиллаштирилган;

тозалаш қурилмасига эга бўлган фотоэлектрик модулнинг нисбий фойдали иш коэффициенти, чангланган фотоэлектрик модулга нисбатан ўртача 7,7 % га тиклангани, унинг чиқиш қуввати 7,9 % га ортиши экспериментал ва назарий кўрсаткичларни қиеслаш ёрдамида асосланган;

илк бор РС 711 ва беш контактли универсал релелардан ташкил топган электр механик тизим асосида модул узунлигини ҳисобга олиб фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозалаш учун зарур бўлган вақт сарфини қисқартиришга имкон берувчи усул ва алгоритм такомиллаштирилган.

**Тадқиқотнинг амалий натижаси** қуйидагилардан иборат:

Қуввати 250 Вт бўлган ФЭМни 25-30 Вт энергия истъемоли билан битта тозалаш циклини 24 секундда амалга оширишни имкон берувчи фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозаловчи қурилмани электр механик тизим ва энергия тежамкор электр двигател асосида тажрибавий намунаси яратилган (“Қуёш панелини тозалаш қурилмаси” № SAP 20240036, 20.03.2024 й.);

Фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозалаш учун зарур бўлган вақт сарфини қисқартиришга имкон берувчи усул ва алгоритм такомиллаштирилган (“Қуёш панелини тозаловчи қурилмани автоматлаштириш учун дастурий таъминот” № DGU 38259, 18.05.2024 й.).

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги.** Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги натижалар юқори аниқликдаги ўлчов воситалари ёрдамида олинганлиги, кўп сонли ўлчанганлиги, шунингдек, ишлаб чиқаришга жорий этиш орқали асосланганлиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти ФЭМларнинг самадорлигини қамайиш механизми ва уни тиклаш усуллари илмий тушунишни чуқурлаштиришга имкон берувчи фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозалаш жараёнини математик моделлаштиришни янги ёндашуви таклиф этилганлиги, шунингдек ноқулай ташқи муҳит шароитларида ҚТЭМга хизмат кўрсатиш технологияларини ишлаб чиқиш бўйича илмий базани кенгайтиришга имкон берувчи энергия самарадор автоматлаштирилган тозалаш қурилмаларини ишлаб чиқиш тамоиллари шакллантирилганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти таклиф этилган конструкцияси такомиллаштирилган тозаловчи фотоэлектрик станцияларга, мавжуд инфратузилмани сезиларли ўзгартирмасдан фотоэлектрик

модуллернинг чангланиш муаммосини самарали йечимини таъминлаб, қўллаш мумкинлиги билан изоҳланади.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Фотоэлектрик модуллернинг оптик юзасини чангдан тозаловчи қурилмани такомиллаштириш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

фотоэлектрик модуллернинг оптик юзасини чангдан тозаловчи конструкцияси такомиллаштирилган қурилма «SUN-HIGHTECH» МЧЖ га жорий этилган («Ўзэлтехсаноат» уюшмаси 24.06.2024 й. 04-3/971-сон маълумотномаси). Натижада фотоэлектрик модуллернинг оптик юзасини чангдан тозалаш ҳисобига йилига қўшимча 11880 кВт·соат яшил электр энергиясини олиш, 4098,6 кг қўмир ва 4466,88 м<sup>3</sup> табиий газни тежаш ҳамда ўз навбатида СО<sub>2</sub> эмиссиясини мос равишда 14754,96 кг ва 9380,44 кг га қамайтириш мумкинлиги аниқланган. Бунда қутилаётган иқтисодий самара 65 284 818 сум соф фойда олиш имконини берган;

фотоэлектрик модуллернинг оптик юзасини чангдан тозалаш учун зарур бўлган вақт сарфини қискартиришга имкон берувчи усул ва алгоритм «SUN-HIGHTECH» МЧЖ га жорий қилинган («Ўзэлтехсаноат» уюшмаси 24.06.2024 й. 04-3/971-сон маълумотномаси). Натижада, фотоэлектрик модуллернинг оптик юзасини чангдан тозаловчи қурилма ишлаш вақтини мавжуд аналогига нисбатан ўртача 8 марта қискартириш имконияти яратилган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Тадқиқот натижалари 2 та халқаро ва 6 та республика илмий-амалий анжуман ва семинарларда муҳокомадан ўтган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши.** Диссертация мавзуси бўйича жами 21 та илмий иш чоп этилган, шулардан, 1 та саноат намунаси учун патент, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг фалсафа доктори (PhD) диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган илмий нашрларда 8 та мақолалар, жумладан 6 та республика ва 2 та чет эл илмий журналларида ҳамда 2 та Scopus базасига кирувчи тўпламларда нашр этилган, 2 та ЭҲМ учун дастурга гувоҳнома олинган.

**Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши.** Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертациянинг ҳажми 121 бетдан иборат.

## **ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ**

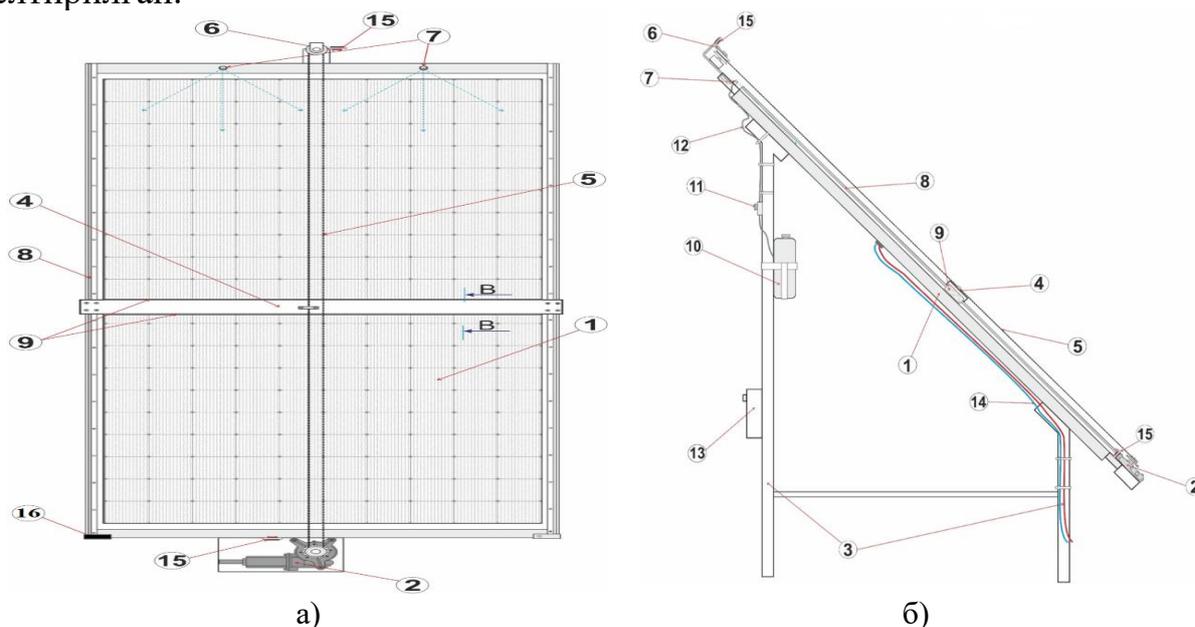
**Кириш** қисмида тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари, объекти ва предметлари тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён этилган, олинган натижаларнинг илмий-амалий аҳамияти ва ишончлилиги ёритилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий этилганлиги, ишнинг апробация натижалари, эълон қилинган ишлар ва диссертациянинг тузилиши ва ҳажми бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг “**Фотоэлектрик модулларнинг оптик юзаларини тозаловчи қурилмаларни ишлаб чиқиш бўйича замонавий ёндашувлар**” номли биринчи бобида фотоэлектрик модулларнинг (ФЭМ) оптик юзасини (ОЮ) чангдан тозаловчи турли ҳил қурилмаларни ишлаб чиқиш, яратиш бўйича тадқиқотларларни замонавий ҳолатини таҳлил қилинган, ФЭМларнинг ОЮни тозалаш бўйича усуллар ва мавжуд норматив-ҳуқуқий база қўриб чиқилган. Мавжуд технологияларнинг таҳлили шуни кўрсатадики (механик, роботлашган, контактсиз, ҳимояли қопламалар) сезиларли камчиликлар ва чекловларга эга (юқори харажатлар, эскириш, юқори сув талаби ва бошқа), шунинг учун ушбу камчиликлар асосида тадқиқот мақсади ва вазифалари белгиланган.

Диссертациянинг “**Фотоэлектрик модулларнинг оптик юзаларини тозаловчи қурилманинг параметрларини танлаш ва асослаш**” иккинчи бобида ФЭСларнинг самарадорлигига технологик инновацияларни тасирини ишлаб чиқилган тозалаш қурилмаси (ТҚ) мисолида иқлим шароитларини ҳисобга олиб қўриб чиқилган ва унинг элементларини танлашнинг асосий мезонлари аниқланган.

Қурилманинг самарадорлигини аниқлаш бўйича асосий мезонлар – ФЭМларни шикастламасдан чангдан юқори самарали тозалаш, иқтисодий қопланиши, ҳалқаро стандартларга (IEC 61215, IEC 61730 ва бошқа) мувофиқлиги, автоном ва хавфсиз ишлаши, энергияни минимал истъмоли, чидамлилиқ, модулларнинг хавфсизлиги, яни тозалаш ФЭМларнинг ойнасига зарар йетказмаслиги ва ёриқлар ҳосил қилмаслиги керак. Ушбу мезонлар асосида ФЭМларнинг ОЮни чангдан тозаловчи қурилма такомиллаштирилди, электр механик тизим, унинг принципиал ва электр схемалари, шунингдек қурилманинг ҳаракат алгоритми ишлаб чиқилди.

1-Расмда ишлаб чиқилган тозалаш қурилмасини умумий кўриниши келтирилган.

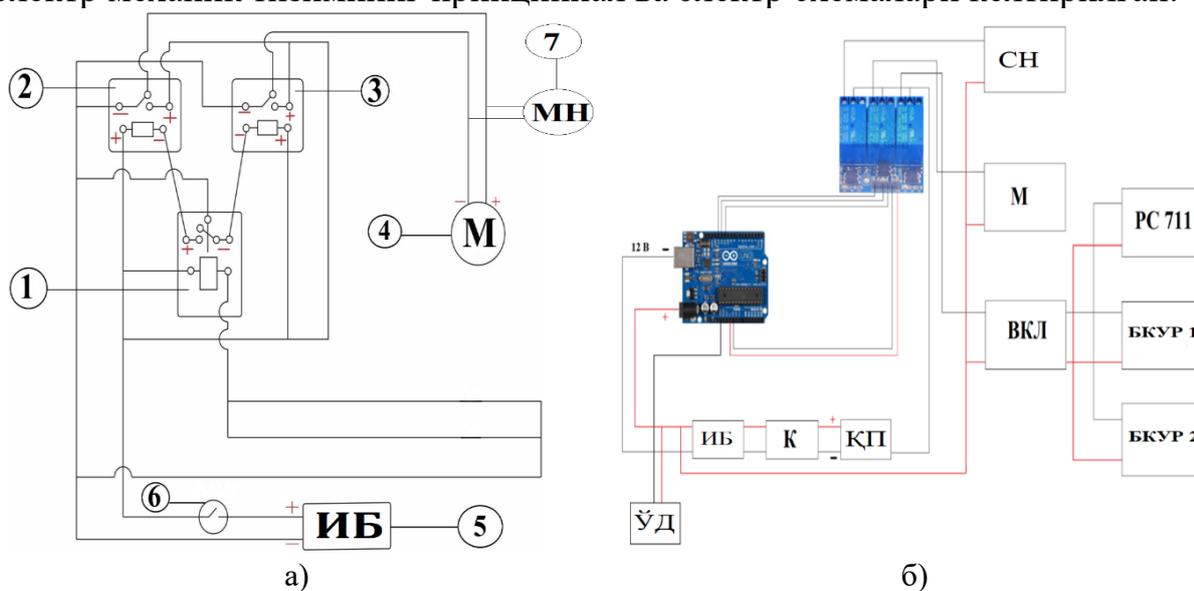


1-расм. Тозалаш қурилмасининг чизмалари: а – олдидан кўриниши; б – ёндан кўриниши

Қурилма: 1 – ФЭМ, 2 – электрдвигатель (ЭД), 3 – рама, 4 – тозалаш блоқи (ТБ), 5 – трос, 6 – айланиш блоқи (АБ), 7 – форсункалар, 8 – цилиндрик йўналтирувчилар, 9 – поролон, 10 – сув резервуари, 11 – насос, 12 – шланг, 13 – электр механик қисм (ЭМК), 14 – ФЭМнинг коннектори, 15 – йўналишни ўзгартирувчи кнопка, 16 – ёруғлик ўтказувчанлик датчиги дан ташкил топган.

ТҚ – ТБ орқали ФЭМнинг юзасини чангдан тозаловчи техник йечим ҳисобланади. Қурилма ўзининг истъемоли ва тозалашни ёруғлик ўтказувчанлик датчиги орқали автоматик тарзда бошқарадиган Arduino Uno платаси билан жиҳозланган. ТҚнинг конструкцияси ФЭМларнинг ҳар қандай ўлчамлари ва габаритларига мосланиши мумкин. Қурилманинг асосий характеристикалари: битта тозалаш циклининг вақти ~24 с, энергия истъемоли ~25–30 Вт, массаси ~10 кг, тозаловчи материалнинг (поролон) ресурси 60 цикл дан кам эмас. Қурилма иқлим шароитларига қараб қуруқ режимда ёки намлаш билан ишлаши мумкин. Конструкциянинг принцинал янгилиги – энергия самарадор ЭДни қўлланилиши, тозалаш учун вақт ( $t_{\text{тозалаш}}$ ) сарфини қисқартиришга имкон берувчи алгоритм ва электр механик тизимни такомиллаштирилиши. Ишлаб чиқилган ТҚси ўрнатишда қулай. Монтаж бевосита мавжуд ФЭМларга уларнинг трекерларини ўзгартирмасдан амалга оширилиши мумкин: цилиндрик йўналтирувчилар ФЭМларнинг рамасига стандарт маҳкамлагичлар билан қотирилади. Қатта бўлмаган оғирлик ТҚсини қўтарма техникасиз қўл билан ўрнатиш имконини беради. Конструкция бутун йил давомида очик хавода фойдаланиш учун мўлжалланган. Қурилманинг барча асосий қисмлари чангдан ва намликдан химояга эга. Қурилма юкори ҳамда манфий ҳарорат шароитларида ишлай олади. Модуль тузилиш эвасига трос, цилиндрик йўналтирувчилар ва ТБнинг габаритлари ФЭМларнинг ҳар қандай габаритларига мослаша олади.

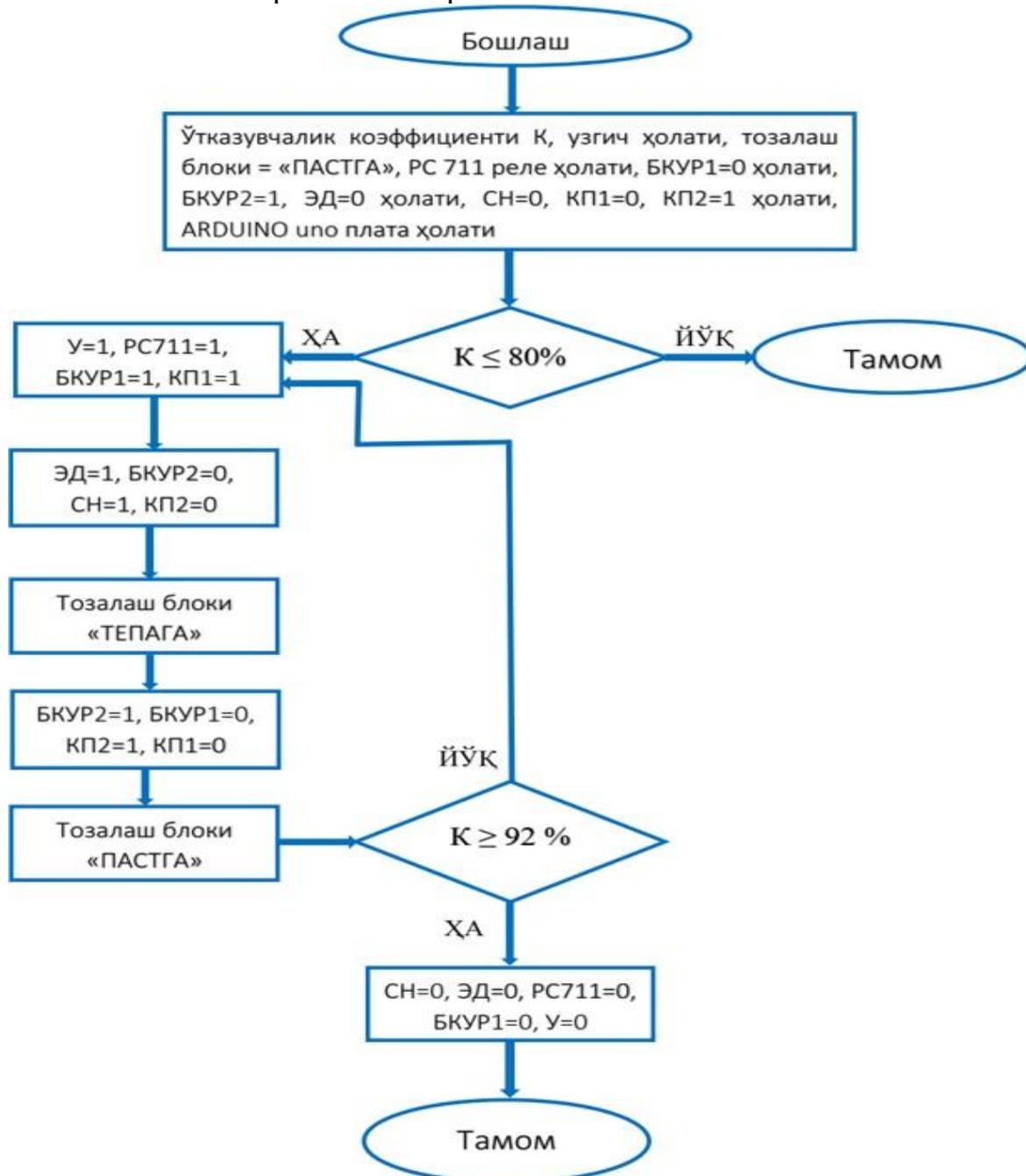
2-Расмда қурилмани автоматлаштириш мақсадида ишлаб чиқилган электр механик тизимнинг принцинал ва электр схемалари келтирилган.



2-расм. Қурилма электр механик тизимининг схемаси: а – электр; б – принцинал

Электр механик тизим қўйидаги элементлардан ташкил топган: 1 – реле РС 711, 2,3 – беш контактли универсал электр магнитли реле, 4 – электр двигатель (ЭД), 5 – истъемол блоқи, 6 – паст кучланишли ўзгартиргич, 7 – насос, ARDUINO uno, контроллер ва реле модули.

3-Расмда ФЭМларнинг ОЮни чангдан тозалаш учун ишлаб чиқилган қурилмани ишлаш алгоритми келтирилган.



3-расм. Тозалаш қурилмасини ишлаш алгоритми

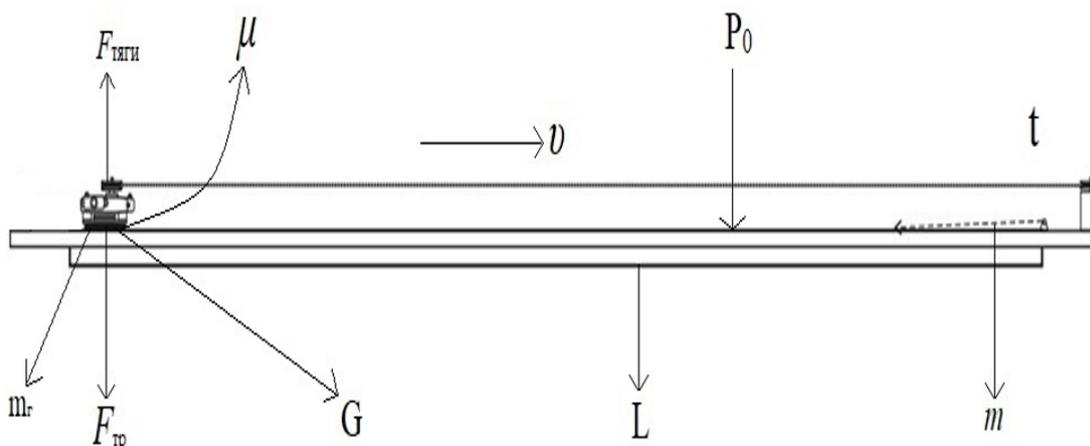
ТҚ қўйидаги тарзда ишлайди: ФЭМ ойнасининг ёруғлик ўтказувчанлик коэффициентини  $K_{\text{ёр}} \leq 80\%$  бўлса, ёруғлик ўтказувчанлик датчиги платага, плата эса ўзгартиргичга сигнал юборади, натижада насос ишлаб резервуардан сувни ОЮга сепеди. Шу вақтда ЭД ҳам ишга тушиб, ТБни ҳаракатга келтиради, у эса ўз навбатида ФЭМнинг ОЮси бўйлаб ҳаракатни амалга оширади. ТБ модулнинг юқори (пастки) қисмига йетганида, у ҳаракат

йўналишини ўзгартирувчи кнопкага ўрилади ва натижада унинг ҳаракат йўналиши қарама қарши томонга ўзгаради. Агар  $K_{\text{ЭР}} \geq 92\%$  бўлса, ТБ модулнинг пастки қисмига жойлашади ва ўзининг ҳаракатини тўхтатади. Шундан сўнг, ЭД ва насос ўз ишини яқунлайди, ўзгартиргич эса ўзининг контактларини ёпади ва шу тариқа тозалаш жараёни яқунланади. Шундай тарзда ишлаб чиқилган қурилма ёрдамида ФЭМнинг ОЮни тозалаш жараёни амалга оширилади.

Шундай қилиб, конструкция ва автономлик жихатларидан, ишлаб чиқилган қурилма турил ҳил ёндашувларнинг афзалликларини бирлаштиради: оддий пассив йечимлар каби у йенгил ва ихчам, бироқ илғор роботлашган ТҚ каби арзон ва бутунлай автоматлашган.

Диссертациянинг “**Фотоэлектрик модуларнинг оптик юзасини тозалаш жараёнларининг математик моделлаштириш**” деб номланган учинчи боби ФЭМларнинг ОЮни тозалаш жараёнини математик моделлаштиришга бағишланган.

4-Расмда ФЭМнинг ОЮни тозалаш жараёнини физик модели келтирилган. Схема модул узунлиги  $L$ , поролонни ФЭМнинг ойнасига босими  $P_0$ , тозалаш вақти  $t_{\text{тозалаш}}$ , танланган ЭДнинг тортиш кучи  $F_{\text{тортиш}}$ , ишқаланиш коэффиценти  $\mu$ , контакт юзаси  $G$  ва сув массасини  $m$  ўз ичига олади.



4-расм. ФЭМ ОЮни тозалаш жараёнининг физик модели

Ушбу жараённи моделлаштиришда куёидаги факторлар ҳисобга олинган:

Ишқаланиш модели:

$$F_{\text{ишқ}} = \mu \cdot N, \quad (1)$$

Бунда  $F_{\text{ишқ}}$  – ишқаланиш кучи (Н);  $\mu$  – ишқаланиш коэффиценти (-);  $N$  – нормал куч (Н).

Сув массаси:

$$N = P + mg, \quad (2)$$

бунда  $m$  – поролонни сув ютгандан кейинги массаси (кг).

Ҳаракат тенгламаси:

$$F_{\text{хар}} = F_{\text{тортиш}} - F_{\text{иш}} = m_{\Gamma} f \quad (3)$$

Ишқаланиш камайиши:

$$\mu(t) = \mu_0 e^{-\alpha t}, \quad (4)$$

бунда  $\mu_0$  – ишқаланиш коэффициентининг бошлангич қиймати.  
Самарали тозалаш:

$$t_{\text{тозалаш}} = \frac{L}{v}, \quad (5)$$

бунда  $L$  – ФЭМнинг узунлиги (м);  $v$  – поролон ҳаракатининг тезлиги (м/с),  $v = v_0 + ft$ .

Юкоридаги боғланишларни ҳисобга олиб қуйидаги тенгламани ҳосил қиламиз:

$$F_{\text{ишқ}} - (\mu_0 e^{-\alpha t})(P + m_0 g) = m_{\Gamma} f(t), \quad (6)$$

бунда  $F_{\text{ишқ}}$  – электр двигателнинг тортишиш кучи (Н);  $g$  – эркин тушиш тезланиши (м/с<sup>2</sup>).

Тасаввур қиламиз, тозалаш қурилмаси битта тизим деб, ушба тизимда таъсир этаётган нормал кучни аниқлаймиз:

$$N(t) = P + m(t)g, \quad (7)$$

бунда  $m(t)$  –  $t$  вақт momentiдаги поролон массаси.

Энди тизим учун ҳаракат тенгламасини дифференциал тенгламасини тузамиз:

$$m_{\Gamma} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F_{\text{ишқ}} - \mu(t)N(t), \quad (8)$$

бунда  $\frac{d^2 x(t)}{dt^2}$  – поролон тезланиши;  $x(t)$  –  $t$  моментдаги поролон ҳолати.

Тасаввур қиламиз, ФЭМнинг Оюга сув  $q$  тезлик билан тушади:

$$m(t) = \begin{cases} m_{\Gamma} + qt, & \text{если } qt \leq m_0 \\ m_{\Gamma} + m_0, & \text{если } qt > m_0 \end{cases} \quad (9)$$

Юкоридаги боғланишларни ҳисобга олган холда тизим учун тўла дифференциал тенгламани ҳосил қиламиз:

$$m_{\Gamma} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F_{\text{ишқ}} - \mu_0 e^{-\alpha t} (P + (m_{\Gamma} + \min(qt, m_0))g) \quad (10)$$

Ушба тенгламани йечиш учун босиб ўтилган йўлни тезлик бўйича

интеграллаймиз:

$$x(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau = \int_0^t \left( \frac{F_{\text{ишқ}} - \mu_0 e^{-\alpha t} (P + (m_{\Gamma} + \min(qt, m_0))g)}{m_{\Gamma}} \right) dt \quad (11)$$

Ушбу 11 модел ёрдамида ФЭМнинг ОЮни тозалаш учун зарур бўлган энергия сарфини аниқлашда фойдаланамиз:

$$W_{\text{хар}} = \int_0^T F_{\text{хар}} v(t) dt, \quad (12)$$

бунда  $F_{\text{хар}}$  – поролонни ҳаракатга келтирувчи натижавий куч (Н),  $F_{\text{хар}} = F_{\text{тортиш}} - \mu(t) \cdot N(t)$ ;  $W$  – ФЭМнинг ОЮни тозалаш учун зарур бўлган энергия миқдори (Дж).

Агар поролонни ҳаракатга келтирувчи натижавий кучни ҳисобга олсак:

$$W_{\text{хар}} = \int_0^T (F_{\text{тортиш}} - \mu_0 e^{-\alpha t} (P + (m_{\Gamma} + \min(qt, m_0))g)) (v_0 + ft) dt \quad (13)$$

Агар ТБни параметрларини ҳисобга олсак, нормал куч:

$$N = g \cdot m_{\text{нам}} = g \cdot \left( 0.007 + 0.007x \frac{M}{2} \right) \quad (14)$$

Ишқаланиш кучи эса куйидаги кўринишга эга булади:

$$F_{\text{ишқ}} = g \cdot \mu_0 e^{-\alpha M} = g \cdot \left( 0.007 + 0.007x \frac{M}{2} \right) \quad (15)$$

Агар  $P_0$  бу ФЭМнинг ОЮга таъсир этаётган бошлангич босим бўлса, нормал куч:

$$N = P_0 \cdot G \quad (16)$$

ТБни ҳаракатга келтириш учун зарур бўлган энергия миқдори:

$$W_{\text{хар}} = \int_0^T (\mu \cdot N) v(t) dt \quad (17)$$

Агар ҳаракат ўзгармас тезлик билан амалга ошаётган бўлса, энергия кўйидагича аниқланади:

$$W_{\text{хар}} = (\mu \cdot N) \cdot v \cdot T \quad (18)$$

Агар ишқаланишни сув сарфига боғлиқлиги ҳисобга олинса, энергия куйидагича аниқланади:

$$W_{\text{хар}} = (\mu_0 e^{-\alpha M} \cdot N) \cdot P_0 \cdot G \cdot v \cdot T \quad (19)$$

Агар тозалаш вақтини тезлик ва узунликга боғлиқлиги ҳисобга олсак,

энергия куйидагича аниқланади:

$$W = \mu_0 e^{-\alpha M} \cdot P_0 \cdot G \cdot L \quad (20)$$

Шундай қилиб, 20-формуладан ФЭМнинг ОЮни чангдан тозалаш учун зарур бўлган энергия миқдорини аниқлашга имкон беради.

ТҚси параметрларини амаалий ҳисоб китобини мисоли келтирилади. Танланган HANWHA ФЭМнинг (қуввати 250 Вт) характеристикаларини ҳисобга олиб, ишлаб чиқилган ТҚнинг техник-эксплуатацион кўрсаткичларига асосланган ҳисоблашлар ўтказилган. Ҳисоблашлар учун намунавий ФЭМнинг ўлчамлари  $\sim 1,7 \times 1,0$  м ( $S=1,67\text{м}^2$ ) ва ТҚнинг параметрларидан фойдаланилган (масса,  $t_{\text{тозалаш}}$  цикли, истъемол қилинадиган қувват ва бошка). Шунингдек, ҳисоблашларда танланган оптимал режимларларни тасдиқлаш учун математик моделдаги боғланишлар ҳисобга олинган. ТҚнинг массаси  $m \sim 10$  кг ни ташкил қилади ва ФЭМга ва монтаж конструкциясига рухсат этилган қўшимча йукламадан ошмайди, шунинг учун ТҚ танланган модул билан хавфсиз интеграллашади. Габарит ўлчамлар 1,7 м га 1,0 м ни ташкил қилади. Тозалагич конструкцияси ФЭМнинг ўлчамларига мос келади: ТБнинг кенглиги модул кенглигига ( $\sim 1,0$  м) мос келади.

Шундай қилиб, ТҚси ФЭМга осон қотирилади ва унинг габаритидан чиқмайди.

1 м<sup>2</sup> юзага солиштирма масса: тизим массасини тозаланадиган ОЮнинг сиртига нисбати орқали ҳисобланади. Танланган ФЭМнинг юзаси  $S=1,67\text{м}^2$ . У ҳолда масса куйидагича ҳисобланади:

$$m_{\text{сл}} = \frac{m_{\text{кур}}}{S_{\text{оч}}} = \frac{10 \text{ кг}}{1,67\text{м}^2} \approx 5,98 \text{ кг/м}^2 \quad (21)$$

Солиштирма массанинг қийматидан кўринадикки, ФЭМнинг бирлик юзасига тўғри келадиган юк катта эмас. Солиштириш учун, ФЭМнинг ўзини солиштирма оғирлиги  $\sim 11,4 \text{ кг/м}^2$  ни ташкил қилади.

Шундай қилиб, ТҚси ФЭМга юкламани унинг оғирлигидан 50 % га кўп бўлманган миқдорга оширади, бу эса хавфли бўлган механик кучланишни келтириб чиқармайди.

ТҚси ишининг чиқиш параметрлари. 1 м<sup>2</sup> га сув сарфи: намли тозалаш учун қурилмада ФЭМнинг ОЮга сувни сепадиган насос бор. Экспериментал қузатувлар кўрсатдики, битта ФЭМни битта ювиш циклига кам миқдордаги сув керак. Битта цикл учун сув хажмини қиймати 0,3 л деб қабул қилинди. ФЭМнинг бирлик юзасига солиштирма сув сарфи куйидагича аниқланади:

$$q_{\text{суб}} = V_{\text{ц}} \cdot S = 0,3\text{л} \cdot 1,67\text{м}^2 = 0,501 \text{ л/м}^2 \quad (22)$$

Ушбу кўрсаткич йетарлича оптимал: ОЮнинг хар бир метр квадратига 0,5 л дан кам.

1 м<sup>2</sup> учун энергия сарфи (Вт·с/м<sup>2</sup>): ТҚси иш вақтида ЭД ва насоснинг

энергия истъемоли  $P=25-30$  Вт ни ташкил қилади. ТБни ФЭМнинг ОЮси бўйлаб ҳаракати учун зарур бўлган ўртача қувват  $35$  Вт ни ташкил қилади. Тозалашнинг битта цикли  $t=24$  секунд давом этади, яни  $t=24/3600=0,00667$  соат. Битта циклга қурилма сарфлайдиган энергия қуйидагича аниқланади:

$$W_{\text{ц}} = P \cdot t = 35 \cdot 0.00667 \text{ с} \approx 0.23345 \text{ Вт} \cdot \text{с} \quad (23)$$

ФЭМнинг бирлик юзасига ушбу энергия сарфи қуйидагича аниқланади:

$$W_{\text{эн}} = W_{\text{ц}} \cdot S = 1.67 \text{ м}^2 \cdot 0.23345 \text{ Вт} \cdot \text{с} \approx 0.3898 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{м}^2 \quad (24)$$

ФЭМнинг  $1 \text{ м}^2$  ни тозалаш учун тахминан  $0,3898 \text{ Вт} \cdot \text{с}$  энергия керак, бу эса  $0,2338$  кДж га тенг. Модулнинг ўзи  $E=1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$  да  $24$  секунд да  $1,7 \text{ Вт} \cdot \text{с}$  ( $250 \text{ Вт} \times 0,00667 \text{ с}$ ) ЭЭ ишлаб чиқаради, бу эса тозалаш учун энергия сарфидан кўп. Математик модел кўрсатадики, намликни оптималлаш энергия сарфини камайтиради: кўп бўлмаган сув миқдори ишқаланиш кучини камайтиради ва двигател ишини  $q=0,4-0,5 \text{ л} / \text{м}^2$  да минималлаштиради.

Шундай қилиб ҳисобланган  $\sim 0,3898 \text{ Вт} \cdot \text{с} / \text{м}^2$  энергия сарфи ишлаб чиқилган ТҚсини энергия самарадорлигини тасдиқлайди.

Диссертациянинг **“Иқлим факторларини ҳисобга олиб фотоэлектрик модулларнинг оптик юзаларини тозаловчи самарали қурилмаларни қўллаш бўйича экспериментал тадқиқотлар”** деб номланган тўртинчи бобида тозаланган ва чангланган ФЭМларнинг натур шароитларда экспериментал тадқиқотлар натижалари келтирилган, шунингдек ишлаб чиқилган қурилманинг техник-иқтисодий баҳолаш амалга оширилган.

Экспериментал тадқиқотлар Тошкент давлат техника университети “Қайта тикланувчи энергия манбалари” кафедраси ўқув-лаборатория гелио-полигониди ўтказилган. Синов модули сифатида  $250 \text{ Вт}$  қувватли иккита бир ҳил поликристалл HANWHA ФЭМ қўлланган. Иккала модул горизонтга  $\sim 25^\circ$  бурчак остида ўрнатилган ва таққосланадиган ёруғлик шароитларини таъминлаб жануб томонга қаратилган. Битта ФЭМ “чангланган” (кейинчалик – ТНФЭМ, тозаланмаган модул) эталон сифатида ишлатилган, иккинчиси – ишлаб чиқилган қурилма билан жиҳозланган ва доимий тозаланган (кейинчалик – ТФЭМ, тозаланган модул).

Электр параметрларни ўлчаш учун сертификатланган жиҳозлар ишлатилган. Хусусан,  $I_{\text{КТ}}$ ,  $I_{\text{МРР}}$ ,  $U_{\text{МРР}}$ ,  $U_{\text{С.Ю.}}$ ,  $P_{\text{ЧИК}}$  ва ФИК ( $\eta$ )  $\pm 1,5\%$  ҳатоликга эга портатив METREL Mi 3108 евро тестер ёрдамида аниқланган. Бир вақтнинг ўзида қуйидаги метеорологик параметрлар ўлчанган:  $E_{\text{р}}$  – қуёш радиацияси (пиранометр SPM DT-1307,  $\pm 10 \text{ Вт} / \text{м}^2$ ), атроф муҳит ҳарорати ( $T_{\text{АТМ}}$ ) ва ҳавонинг нисбий намлиги ( $Y_{\text{ХН}}$ ) (электрон датчиклар), шунингдек инфрақизил UNI-T ( $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) камера билан ФЭМнинг ОЮни термографияси амалга оширилган.

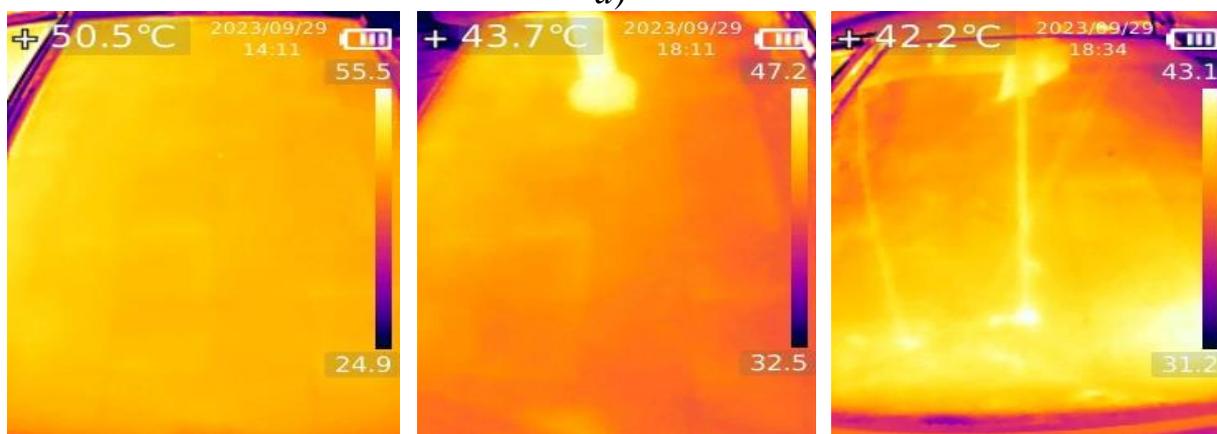
5-Расмда чангланган ва тозаланган ФЭМларнинг экспериментал тадқиқотлар жараёни келтирилган.



5-Расм. ТҚнинг экспериментал тадқиқот жараёни

6-8-Расмларда ФЭМларнинг экспериментал тадқиқотларида олинган натижалар келтирилган.

а)



б)

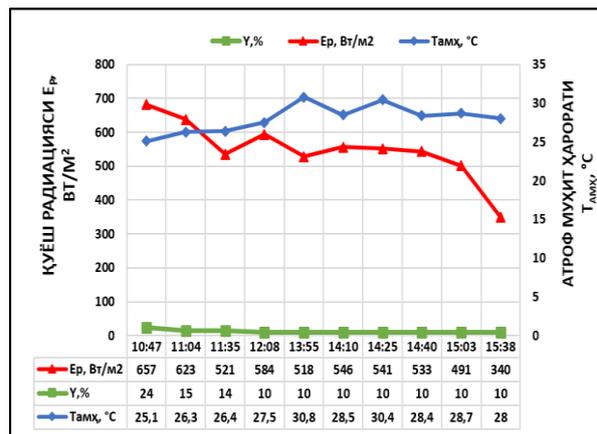


6-Расм. ФЭМлар ОЮнинг ҳароратини вақтинчалик боғланишлари: а –чангланган; б – тозаланган

Тепловизор маълумотларига қўра ОЮдаги ҳароратлар фарқи ўртача~2.1 °С ни ташқил қилди: ТНФЭМнинг ҳарорати юқори бўлган. ТФЭМ қизишининг камайиши иссиқлик исрофи камайганини ва доимий тозалашда унинг яроқлилиқ муддати ортишини қўрсатади.



а)

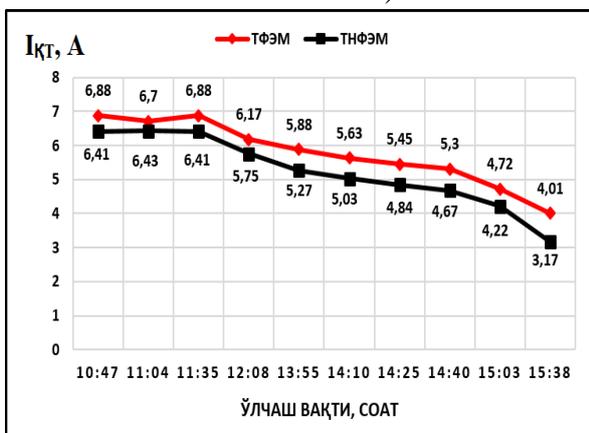


б)

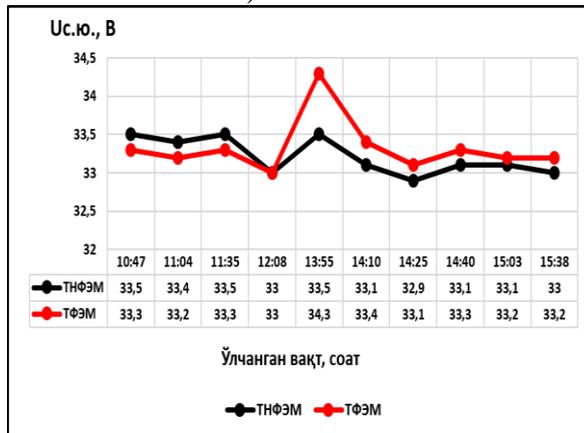
7-расм. Метеопараметрларни вақтинчалик боғланишлари: а-2023 йил учун Тошкент шаҳрининг ҳаводаги ўртача суткалик чанг концентрацияси; б-қуёш радиацияси, ҳаво ҳарорати ва намлиги

7а-Расмдан кўринадикки, кўрсатилган даврда ҳавонинг чангланганлиги санитар нормадан кўп қарра ошган. Масалан, 03.09.2023 да концентрация ~2 мг/м<sup>3</sup> га йеткан, бу эса нормадан 13 мартадан кўпроқ. Эксперимент куни об-ҳаво шароитлари юқори ҳаво ҳарорати ( $T_{AMX,MAX} = 30,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $T_{AMX,MIN} = 25,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) ва жуда паст нисбий намлик ( $Y_{\text{ўр}} \approx 12,3 \text{ } \%$ ) билан тавсифланди. Қуёш нурланиши оқимининг зичлиги кун давомида 340 дан 657 Вт/м<sup>2</sup> гача ўзгариб турди.

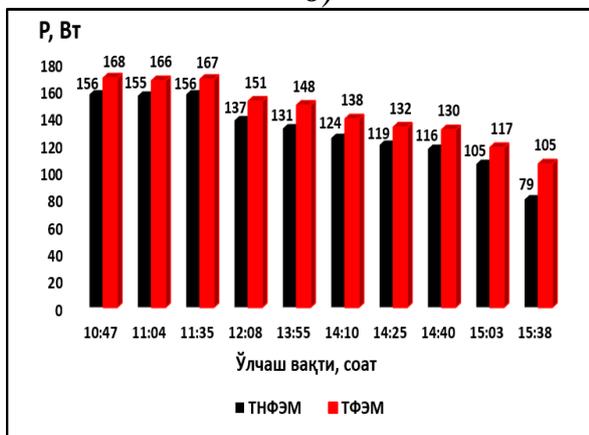
а)



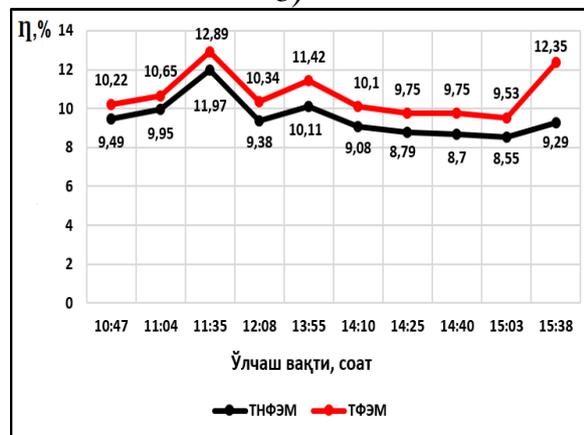
б)



в)



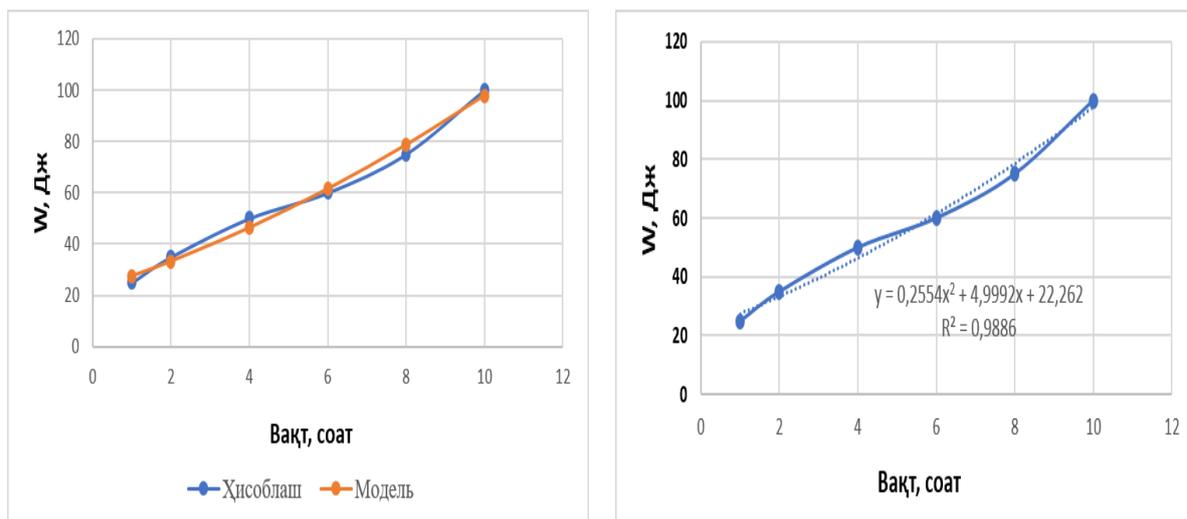
г)



8-расм. ФЭМ параметрларининг вақтинчалик боғланишлари: а-қисқа туташув токи; б-салт юриш кучланиши; в-чиқиш қуввати; г-ФИК (нисбий)

8-Расмдан кўринадикки, ТФЭМ тенг шароитларда ТНФЭМ га қараганда кўп энергия ишлаб чиқарган. Масалан, 10:47 да  $E \approx 657 \text{ Вт/м}^2$ ,  $T_{\text{окр}} = 25,1 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $Y = 23 \%$  да, ТНФЭМ  $I_{\text{КТ}} 6,41 \text{ А}$  га тенг бўлган, ТФЭМнинг  $I_{\text{КТ}}$  эса  $6,88 \text{ А}$  ни ташкил қилди, бу эса  $\approx 7,33 \%$  га кўп. Мос равишда ушбу вақтда чангланган модулнинг  $P_{\text{вых}} 156 \text{ Вт}$  бўлган, тозаланмаганики эса  $168 \text{ Вт}$  га тенг бўлган, яни  $\approx 7,69 \%$  га кўп. Шунингдек чанг борлигида модулнинг нисбий ФИК ( $\eta$ ) сезиларли тушган: 10:47 да ТФЭМ ва ТНФЭМ орасидаги  $\eta$  фарқи  $\approx 7,69 \%$  га йетган (тозаланган модул фойдасига). ФЭМнинг ОЮни мунтазам тозалаш чиқиш параметрларини тозаланмаган ҳолатига нисбатан ўртача  $5\text{--}10 \%$  га ортишига олиб келади. Хусусан, жами ўлчовларга кўра: чангланган модул билан солиштирганда  $I_{\text{КТ}} \approx 8,3 \%$  га,  $P_{\text{чик}} \approx 7,9 \%$  га, нисбий  $\eta 7,8 \%$  га ошади. Бир вақтда тозаланган ФЭМнинг ҳарорати чанг юзали тозаланмаган модулга қараганда  $\approx 2 \text{ }^\circ\text{C}$  га камаяди.

9-Расмда математик моделни солиштириш келтирилган: экспериментал аниқланган нуқталар модел эгри чизигида ётади, бунда корреляция коэффициенти ( $R^2 = 0,9886$ ) 1 га яқинлигини кўриш мумкин.



9-расм. Математик моделни эксперимент натижалари билан солиштириш

Математик модел тизим динамикасини башорат қилишда юқори аниқликни кўрсатди. Натижаларни экспериментал маълумотлар билан мос келиши ҳисобга олинган ишқаланиш коэффициентининг тўғрилигини кўрсатади.

Шундай қилиб, юқори чангли кирланиш шароитларида ФЭМларни мунтазам тозалаш уларнинг самарадорлигини йетарли даражада ушлаб туриш учун зарурлиги тасдиқланди.

1-жадвалда ишлаб чиқилган ТҚни техник-иқтисодий баҳолаш мақсадида амалга оширилган ҳисоб-китобларнинг натижалари келтирилган. Ҳисоб китоблар  $250 \text{ Вт}$  лик  $400 \text{ та}$  ФЭМларни ичига олган  $100 \text{ кВт}$  қувватга эга фотоэлектрик қурилма учун амалга оширилган, бунда чангдан йиллик йўқотишлар  $8 \%$  ни ташкил қилади. Ҳисоб китоблар учун солиштирма норма қабул қилинган:  $1 \text{ кВт}\cdot\text{с}$  учун  $\sim 0,376 \text{ м}^3$  табиий газ еки  $\sim 0,345 \text{ кг}$  кўмир;  $1 \text{ м}^3$  газ ёқилганда  $\sim 2,1 \text{ кг CO}_2$ ,  $1 \text{ кг}$  кўмирда  $\sim 3,6 \text{ кг CO}_2$  ажралиб чиқади.

## 100 кВт қувватлик ФЭСда ТҚни қуллашдаги йиллик самара

Кўрсаткич	ТҚсиз қиймат	ТҚ билан қиймат	Тежаш/ўсиш
ЭЭ генерацияси, кВт·с/йил	11000	11880	+8800 (+8 %)
Тежалган табиий газ*, м <sup>3</sup> /йил	4136	4467	3309 м <sup>3</sup>
Тежалган кўмир*, кг/йил	3795	4099	3036 кг
СО <sub>2</sub> чиқинди қисқариши*, кг/йил	8686–13890	9381–15002	6949–10919**
Харажатлар тежалиши (шартли), \$/йил	3600	3924	3400–3500

Жадвалдан кўринадики, 100 кВт лик ФЭСда ТҚ йиллик ЭЭ ишлаб чиқаришни 8800 кВт·с ошириши мумкин (тозаланмаган вариантга нисбатан ўсиш 8 %). Ушбу кўшимча ЭЭ миқдорини ИЭСда ишлаб чиқарилганида йилига 3309 м<sup>3</sup> газ ёки 3036 кг кўмир ёкишга тўғри келар эди, ва ўз навбатида йилига 9381–15002 кг СО<sub>2</sub> чиқиндиси атроф муҳитга тарқаларди. Натижада қисқартирилган СО<sub>2</sub> чиқиндиси шартли ёқилғига қараб йилига 6949–10919 кг диапазонда эканлиги баҳоланади. Таъкидлаш жоизки, келтирилган рақамлар – ишлаб чиқаришнинг 8 % га ошишига асосланган. Таббий тозалаш (ёмғирлар билан) қамроқ бўлган еки чангланганлик юқори бўлган ҳудудларда самара янада сезиларли бўлиши мумкин.

Шундай қилиб, техник-иқтисодий ҳисоб қитоблар ишлаб чиқилган ТҚдан фойдаланишни мақсадга мувофиқлигини тасдиқлади: қурилма электр энергия генерацияси ва ФЭМларнинг яроқлилик муддатини ортиши ҳисобига ўзини оқлайди, шунингдек энергетикани углерод изини камайтириб экологик фойда келтиради.

## ХУЛОСА

“Фотоэлектрик модулларнинг оптик юзасини чангдан тозалаш қурилмасини такомиллаштириш” мавзусидаги фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилади:

1. ФЭМларнинг ОЮни чагдан тозаловчи замонавий технологиялар ҳолатини, шунингдек иқлим омилларини баҳолаш ва норматив базани таҳлили амалга оширилди. Натижада, ФЭМларнинг ОЮни чангланиши бир неча ойларда ЭЭ генерацияси йўқотилишини 30–50 % гача олиб келади, мавжуд (механик, роботлашган, контактсиз, химояли қоплама) усуллар сезиларли камчиликларга эга (юқори харажатлар, йемирилиш, сувга катта эҳтиёж и бошқа), бу эса қуруқ ва чангли шароитларга мослашган

автоматлаштирилган ва такомиллаштирилган ТҚсини ишлаб чиқишни тақоззо этади;

2. Электр механик тизим ва энергия тежамкор электрдвигател асосида ФЭМнинг ОЮни чангдан тозаловчи қурилма такомиллаштирилди. Натижада, таклиф этилган техник йечим 250 Вт қувватга эга бўлган ФЭМни битта тозалаш циклини 24 с да 25–30 Вт энергия истъемолида амалга ошириш имконини берди (“Қуёш панелини тозалаш қурилмаси” № SAP 20240036, 20.03.2024 й.);

3. Ҳаракатнинг дифференциал тенгламалар системасига асосланган ва электр двигателни динамик харақатеристикасини, ишқаланиш коэффициентини ва кучини ҳисобга оладиган ФЭМ тозалаш жараёнининг математик модели такомиллаштирилган. Натижада ФЭМнинг ОЮни тозалаш учун зарур бўлган энергия миқдорини аниқлаш ва сув сарфини оптималлаштириш имкони яратилган;

4. Қуруқ ва юқори чангланган иқлим шароитларида такомиллаштирилган тозаловчи қурилманинг экспериментал тадқиқотлари ўтказилди. Натижада тозаланган ФЭМнинг қиска туташув токи тозаланмаган модулга нисбатан ўртача 8,3 % га, чиқиш қуввати 7,9 % га ва нисбий ФИК 7,7 % га ортгани, унинг ОЮдаги ҳарорат эса ўртача 2 °С пасайганлиги аниқланди;

5. ФЭМнинг ОЮни тозалаш учун вақт сарфини қисқартиришга имкон берувчи усул ва алгоритм такомиллаштирилди. Натижада тозалаш қурилмасининг ишлаш вақтини аналог билан солиштирганда ўртача 8 марта қисқартириш имконияти яратилган;

6. Тадқиқот натижалари “SUN-HIGHTECH” МЧЖда жорий этилган. Натижада йилига кўшимча 11880 кВт·соат “яшил” ЭЭ олиш, табиий газни 4466,88 м<sup>3</sup> га, кўмирни 4098,6 кг га тежаш, СО<sub>2</sub> эмиссиясини мос равишда 9380,44 кг ва 14754,96 кг га камайтириш имконияти яратилган, бунда кутилаётган иқтисодий самара 65 284 818 (олтмиш беш миллион икки юз саксон тўрт минг саккиз юз ўн саккиз сўм)ни ташкил этган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ  
ДОКТОРА НАУК DSc.03/10.12.2019.Т.03.03 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ  
ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА**

**СОДИКОВ ТИМУР БАХТИЁРОВИЧ**

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ОЧИСТКИ  
ОПТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
МОДУЛЕЙ ОТ ПЫЛИ**

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

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

**Ташкент – 2025**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за В2024.2.PhD/Т3166.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.tdtu.uz) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziynet.uz).

**Научный руководитель:** Зикриллаев Хайрулла Фатхуллаевич  
кандидат физика-математических наук,  
доцент

**Официальные оппоненты:** Узаков Гулом Норбоевич  
доктор технических наук, профессор

Расходжаев Бахрамжан Сабирович  
кандидат технических наук, профессор

**Ведущая организация:** Физико-технический институт АН РУз

Защита диссертации состоится «5» 06 2025 г в 10:30 часов на заседании научного совета DSc.03/10.12.2019.T.03.03 при Ташкентском государственном техническом университете. (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu\_info@tdtu.uz.)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (регистрационный номер - 23). (Адрес: 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 207-14-70.)

Автореферат диссертации разослан «20» 05  
(протокол рассылки № «19» от «05» 2)



**К.Р. Аллаев**

Председатель научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
доктор технических наук, профессор, академик

**И.У. Рахмонов**

Ученый секретарь научного совета  
по присуждению ученых степеней,  
доктор технических наук, профессор

**Р.П. Бабаходжаев**

Председатель научного семинара при  
научном совете по присуждению ученых степеней,  
доктор технических наук, профессор

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

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире с учётом глобального изменения климата с целью увеличения энергоэффективности, срока годности, удобства эксплуатации также снижения срока окупаемости фотоэлектрических модулей и эффективного их использования уделяется особое внимание вопросам разработки различных устройств. В настоящее время в развитых странах «...экспериментально исследовано, что выходная мощность фотоэлектрических модулей, в зависимости от уровня запыленности их оптической поверхности, снижается до 50 %...»<sup>1</sup>. В связи с этим, в том числе особое внимание уделяется на разработку, совершенствованию, применению конструкций и устройств очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли, также повышение энергоэффективности на основе моделирования процесса очистки.

В мире проводятся научные исследования, направленные на моделирование процесса очистки также на разработку, совершенствованию, применению интеллектуальных роботов, различных прозрачных покрытий, конструкций, устройств и методов очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей. Приоритетным в этом направлении являются исследования, в том числе по разработке, совершенствованию также моделированию различных конструкций, устройств и методов, имеющих высокую степень удобства эксплуатации. При этом, разработка недорогих, автоматизированных, быстродействующих, состоящих из отечественных сырья и импортозамещающих устройств очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли также разработка алгоритмов и программ, позволяющих сократить время очистки, считается актуальными задачами.

В нашей Республике реализуются масштабные меры по созданию, совершенствованию и внедрению новых технологических решений в разрезе отраслей экономики с целью снижения энергоёмкости в полтора раза к 2030 году. В новой стратегии развития Узбекистана на 2022-2026 годы определены задачи, в том числе по «бесперебойному обеспечению экономики электроэнергией и активному внедрению технологий «зеленой экономики» во все отрасли, повышению энергоэффективности экономики на 20 %»<sup>2</sup>. При реализации этих задач важным считается проведение научно-исследовательских работ, направленные на решение таких задач как разработка, усовершенствование, создание и математическое моделирование недорогих устройств для очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли, а также разработка алгоритмов и программ для сокращения затрат времени на очистку.

---

<sup>1</sup>Mohamed J.A., Syed A.M. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules // Renewable energy, 2013, Vol.60, pp.633-636. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014>

<sup>2</sup>Указ Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 года “О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы” <https://lex.uz/docs/5841077>

Данное диссертационное исследование служит в определенной степени реализацию задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022 — 2026 годы», в Законе Республики Узбекистан №ЗРУ-940 от 7 августа 2024 года «Закон об энергии, её рациональном использовании и повышении энергоэффективности», Постановлении Президента Республики Узбекистан от 16 февраля 2023 года №ПП-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году», а также в других нормативных правовых документах, связанных с данной деятельностью.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением науки и технологий Республики Узбекистан IV. «Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологии, фотоники и других передовых технологий».

**Степень изученности проблемы.** Научные исследования, направленные на повышение эффективности фотоэлектрических станций, в частности методы очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей и математическое моделирование процесса очистки проводятся в ведущих мировых научных центрах и высших учебных заведениях, в частности: Hong Kong Polytechnic University (Китай), University of Strasbourg (Франция), University of Sharjah (ОАЭ), Sohar University (Оман), Tokyo technology Institute (Япония), Integral University (Индия), Московский энергетический институт МЭИ (Россия), Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (Россия), Катарский научно-исследовательский институт энергетики и окружающей среды (Катар), Ташкентский государственный технический университет (Узбекистан), Ферганский политехнический университет (Узбекистан) и др.

Ряд известных зарубежных ученых, в том числе J. Zijlstra, A.B. Ahmadullah, R. Gao, A.A. Abubakar, A.A. Sharafi, A. Абугхиятха, В.А. Завахурин, Д.И. Амиров, Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, Р.А. Нурғалиева, Ю.Н. Зацаринная и др., внесли большой вклад в решения таких вопросов, как моделирование процесса очистки, также оптимизация, разработка, создание усовершенствованных и упрощенных устройств, конструкций и методов очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли.

Научные труды известных ученых Узбекистана посвящены решению таких научных задач, как разработка, усовершенствование, моделирование, создание устройств и конструкций очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли, также сокращения время очистки. Из них: Р.А. Захидов, Р.Р. Авезов, Р.А. Муминов, М.Н. Турсунов, Н.Р. Авезова, Н.А. Матчанов, В.Г. Дыскин, И.А. Юлдошев, Н.М. Захидов, Е.Т. Абдуллаев, С.К. Шогучкаров, О.О. Холматов, З. Кенжаев. В результате проведенных научных исследований достигнуты значительные результаты по оптимизации режимов очистки оптической поверхности фотоэлектрических

модулей в зависимости от климатических условий.

Несмотря на значительные успехи, научные проблемы, связанные с моделированием, разработкой, усовершенствованием и созданием недорогого, быстродействующего, имеющий высокую степень эксплуатации устройств и конструкций очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли, недостаточно изучены.

В данной диссертационной работе предложены методы усовершенствования математической модели, позволяющая оптимизировать расход воды и определить затрат энергии, которая необходима на очистку оптической поверхности фотоэлектрических модулей с учётом коэффициента трения, усовершенствование недорогого устройства очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли на основе энергосберегающего электродвигателя и электромеханической системы, усовершенствование метода и алгоритма, позволяющий сократить затрат времени, которая необходима для очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли, с учётом длины модуля.

**Целью исследования** повышение эффективности фотоэлектрических модулей за счёт совершенствования конструкции устройства очистки их оптической поверхности от пыли.

**Задачи исследования:**

Провести анализ существующих методов и технических решений, применяемых при очистке оптических поверхностей фотоэлектрических модулей от пыли;

выбрать и обосновать конструктивные элементы устройства очистки с учётом климатических условий;

усовершенствовать математическую модель процесса очистки оптических поверхностей фотоэлектрических модулей;

создать опытный образец устройства очистки и провести экспериментальные исследования для оценки его эффективности и энергетической целесообразности применения;

провести технико-экономическую и экологическую оценку усовершенствованного устройства очистки.

**Объектом исследования** являются устройства и технологические решения, предназначенные для очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли.

**Предметом исследования** составляют процессы и методы повышения эффективности очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей с помощью автоматизированных электромеханических систем, а также принципы их совершенствования и адаптации к климатическим условиям.

**Методы исследования.** В процессе исследования были использованы методы Рунге-Кутты, моделирования процесса очистки, современного математического расчёта, измерения и сравнительного анализа.

**Научная новизна исследования:**

на основе скорости устройства очистки с учётом коэффициента трения

усовершенствована математическая модель, позволяющая определить затрат энергии и оптимизировать расход воды, которая необходима для очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей;

на основе электромеханической системы и энергосберегающего электродвигателя с учётом размеров модуля усовершенствовано устройство очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей в результате осуществления один цикл очистки фотоэлектрического модуля за 24 секунд, которая имеет площадь 1,67 м<sup>2</sup>;

с помощью сравнения экспериментальных и теоретических показателей обосновано, что относительный коэффициент полезного действия фотоэлектрического модуля, которая имеет устройство очистки, по сравнению с запылённым фотоэлектрическим модулем, в среднем восстановлена на 7,7 %, её выходная мощность в среднем увеличена на 7,9 %;

на основе электромеханической системы, состоящей впервые из РС 711 и универсального пяти контактного реле, с учётом длины модуля усовершенствован метод и алгоритм, позволяющий сократить затрат времени, которая необходима для очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли.

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

на основе электромеханической системы и энергосберегающего электродвигателя создан опытный образец устройства очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли («Устройство для очистки солнечной панели» № SAP 20240036 от 20.03.2024 г.), позволяющий производить один цикл очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей мощностью 250 Вт за 24 секунд при энергопотреблении 25-30 Вт;

усовершенствован метод и алгоритм, позволяющий сократить затрат времени, которая необходима для очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли («Программное обеспечение для автоматизации устройства очистки солнечной панели» № DGU 38259 от 18.05.2024 г.).

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов исследования подтверждается адекватностью результатов, полученных путем многократных экспериментальных исследований и измерений с помощью высокоточных измерительных приборов, а также обоснованностью внедрением на практике.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается тем, что предложены новые подходы к математическому моделированию процесса очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли, которые позволяют углублять научное понимание механизмов снижения эффективности фотоэлектрических модулей и способов её восстановления, также сформулированы принципы разработки энергоэффективных автоматизированных устройств очистки, которые позволяют расширить научную базу разработки технологий обслуживания возобновляемых

источников энергии в условиях неблагоприятной внешней среды.

Практическая значимость результатов исследования заключается тем, что предложенное устройство очистки усовершенствованной конструкции может быть внедрен на фотоэлектрических станциях, обеспечивая эффективное решение проблемы запыления фотоэлектрических модулей без значительного изменения существующей инфраструктуры.

**Внедрение результатов исследования.** На основе полученных научных результатов по усовершенствованию устройства очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли:

устройство усовершенствованной конструкции очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли внедрен в ООО «SUN-HIGHTECH» (справка 04-3/971 от 24.06.2024 г., ассоциация «Uzeltexsanoat»). В результате за счёт очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли было установлено, что за год можно дополнительно получить 11880 кВт·час зеленой электроэнергии, сэкономить уголь на 4098,6 кг и газ на 4466,88 м<sup>3</sup>, также соответственно снизить выбросы CO<sub>2</sub> на 14754,96 кг и 9380,44 кг. При этом, ожидаемый экономический эффект позволил получить чистую прибыль в размере 65 284 218 сумов;

метод и алгоритм, позволяющий сократить затрат времени, которая необходима для очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли внедрен в ООО «SUN-HIGHTECH» (справка 04-3/971 от 24.06.2024 г., ассоциация «Uzeltexsanoat»). В результате, создана возможность сократить время работы устройства очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли в среднем в 8 раз по сравнению с существующим аналогом.

**Апробация результатов исследований.** Результаты исследования обсуждались на 2 международных и 6 республиканских научно-практических конференциях и семинарах.

**Опубликованность результатов исследований.** Всего по теме диссертации опубликовано 21 научных работ, в том числе 1 патент на промышленный образец, в научных изданиях, рекомендованных к опубликованию основных научных результатов диссертаций доктора философии (PhD) Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, опубликовано 8 статей, в том числе в 6 республиканских и 2 зарубежных научных журналах и 2 в сборниках, включенных в базу данных Scopus, получен 2 свидетельств на программу ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 121 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В **введении** обоснованы актуальность и необходимость научных исследований, цели и задачи, охарактеризованы объект и предмет исследования, описаны научная новизна и практические результаты,

раскрыто научное и практическое значение работы, приведены сведения по внедрению результатов исследований в практику, по опубликованным трудам и информация о структуре диссертации.

В первой главе диссертации под названием **«Современные подходы по разработке устройств очистки оптических поверхностей фотоэлектрических модулей»** проведён анализ современного состояния исследований по разработке, созданию различных устройств очистки ОП ФЭМ от пыли, рассмотрены существующая нормативно-правовая база и методы по очистке ОП ФЭМ. Анализ существующих технологий показывает, что (механические, роботизированные, бесконтактные, защитные покрытия) обладают существенными недостатками и ограничениями (высокие затраты, износ, высокая потребность в воде и др.), поэтому на основе этих недостатков поставлены цель и задачи исследования.

Во второй главе диссертации **«Выбор и обоснование параметров устройств очистки оптических поверхностей фотоэлектрических модулей»** рассмотрены влияние технологических инноваций на эффективность ФЭС на примере разработанного устройства очистки (УО) с учётом погодных условий и определены основные критерии выбора её элементов.

Основные критерии по определению эффективности устройства – высокая эффективность очистки пыли без повреждения ФЭМ, экономическая окупаемость, соответствие международным стандартам (IEC 61215, IEC 61730 и др.), автономная и безопасная работа, минимальное потребление энергии, долговечность, безопасность модулей, т.е. очистка не должна повреждать стекло ФЭМ и не образовать трещины. На основе этих критерий усовершенствовано устройство очистки ОП ФЭМ от пыли, разработаны электромеханическая система, её принципиальная и электрическая схемы, а также алгоритм действия устройства.

На Рис.1 представлен общий вид разработанного устройства очистки.

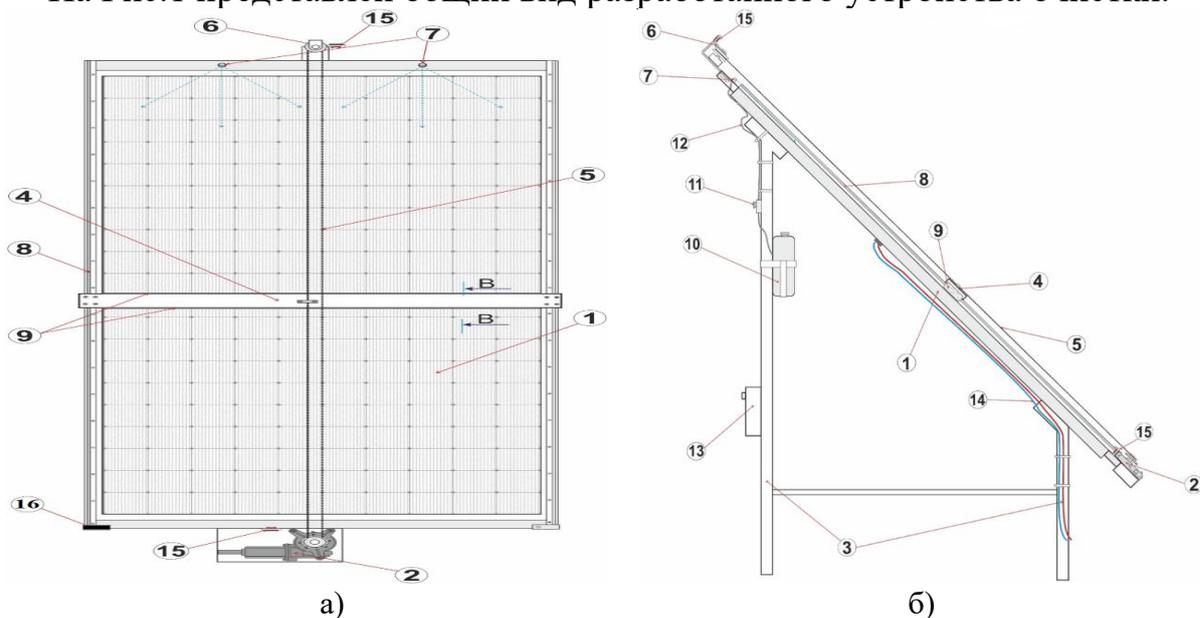


Рис.1. Чертежи устройства очистки: а – вид спереди; б – вид сбоку  
Устройство состоит из: 1 – ФЭМ, 2 – электродвигателя (ЭД), 3 – рамы, 4

– блока очистки (БО), 5 – троса, 6 – блока вращения (БВ), 7 – форсунок, 8 – цилиндрические направляющие, 9 – поролон, 10 – резервуар воды, 11 – насоса, 12 – шланг, 13 – электромеханической части (ЭМЧ), 14 – коннекторов ФЭМ, 15 – кнопка переключения направления, 16 – датчика светопропускания.

УО – является техническим решением, который очищает поверхность ФЭМ от пыли через БО. Устройство оснащено собственным питанием и платой Arduino uno, который автоматическим образом управляет очисткой по датчику светопропускания. Конструкция УО может быть адаптирована под разные любые размеры и габариты ФЭМ. Основные характеристики устройства: время одного цикла очистки ~24 с, энергопотребление ~25–30 Вт, масса ~10 кг, ресурс чистящего материала (поролона) не менее 60 циклов. Устройство может работать в сухом режиме либо с увлажнением, в зависимости от климатических условий. Принципиальная новизна конструкции – применение энергоэффективного ЭД, усовершенствование электромеханической системы и алгоритма, что позволяет сократить затрат времени ( $t_{\text{очистки}}$ ) для очистки. Конструкция разработанного УО удобная в установке. Монтаж может быть выполнен непосредственно на существующие ФЭМ без переделки их трекаров: цилиндрические направляющие крепятся к раме ФЭМ стандартными крепежами. Небольшой вес позволяет устанавливать УО вручную, без подъёмной техники. Конструкция рассчитана на эксплуатацию под открытым воздухом целый год. Все основные части устройства имеют защиту от пыли и влаги. Устройство может работать при высоких также минусовых температурных условиях. Благодаря модульному строению, габариты БО, цилиндрических направляющих и троса адаптируются под любые габариты ФЭМ.

На Рис.2 представлена электрическая и принципиальная схемы и принципиальная схемы электромеханической системы, которые были разработаны с целью автоматизации работы устройства.

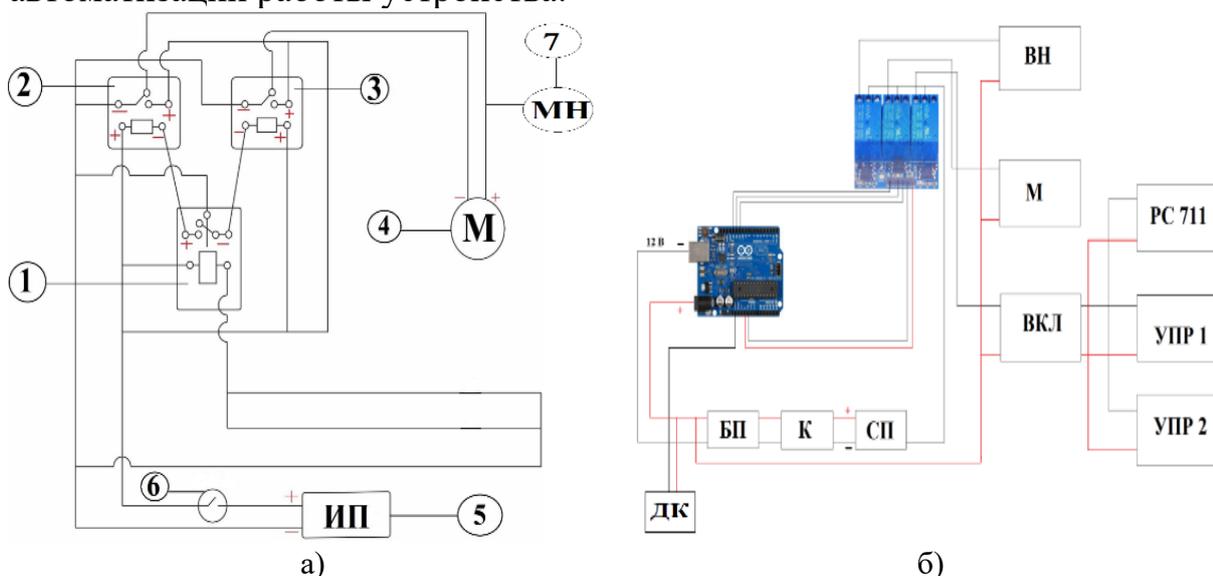


Рис.2. Схема электромеханическая системы устройства: а – электрическая; б – принципиальная

Электромеханическая система состоит из следующих элементов: 1 –

реле РС 711, 2,3 – пяти контактное универсальное электромагнитное реле, 4 – электродвигатель (ЭД), 5 – блок питания, 6 – низковольтный переключатель, 7 – насос, ARDUINO uno, контроллер и модуль реле.

На Рис.3 представлен алгоритм действия разработанного устройства очистки ОП ФЭМ от пыли.

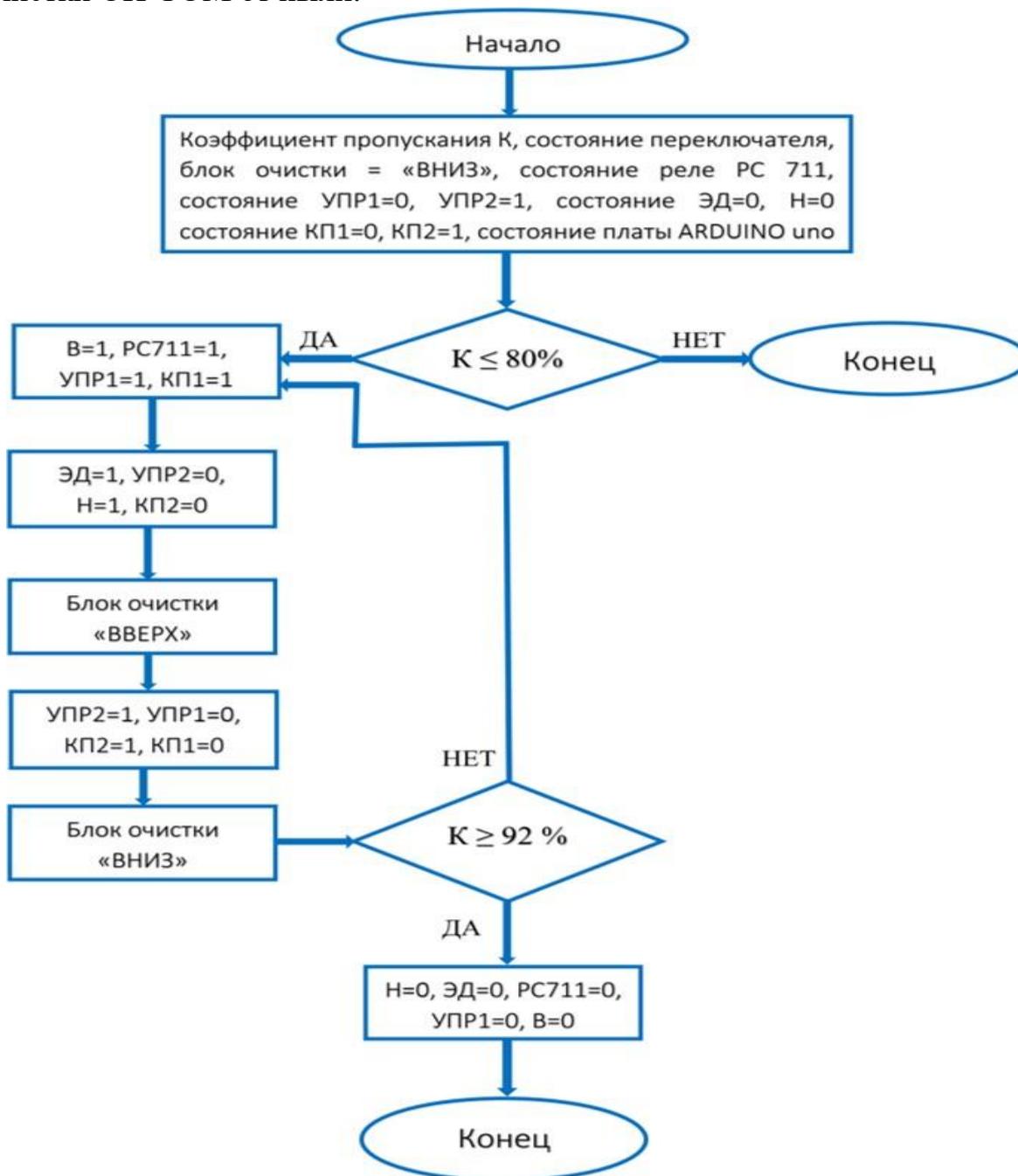


Рис.3. Алгоритм действия устройства очистки

УО работает следующим образом: Когда коэффициент светопропускания стекла ФЭМ  $K_{св} \leq 80\%$ , то датчик светопропускания подает сигнал к плате, а плата к переключателю, в результате насос срабатывая распыляет воду из резервуара на ОП. В этот время сработает ЭД, приводя в действие БО, а он в свою очередь, производит движение по ОП ФЭМ. Когда БО достигнет на верхнюю (нижнюю) часть модуля он коснется к кнопке пререключения направления движения и в результате её направление

движения меняется на противоположную сторону. Если  $K_{св} \geq 92 \%$ , то БО располагается на нижнюю часть модуля и завершит своё движение. После этого завершает свою работу насос и ЭД, а переключатель замыкает свои контакты и при этом процесс очистки завершается. Таким образом осуществляется процесс очистки ОП ФЭМ с помощью разработанного устройства очистки.

Таким образом, в аспектах конструкции и автономности, разработанное устройство сочетает достоинства разных подходов: оно лёгкое и компактное, как простые пассивные решения, но недорогое и полностью автоматическое, как передовые роботизированные УО.

Третья глава диссертации под названием «Математическое моделирование процессов очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей» посвящена к математическому моделированию процесса очистки ОП ФЭМ.

На Рис.4 представлена физическая модель процесса очистки ОП ФЭМ. Схема включает в себя длину модуля  $L$ , давление поролона  $P_0$  на стекло ФЭМ, время очистки  $t_{\text{очистки}}$ , силу тяги  $F_{\text{тяги}}$  выбранного ЭД, коэффициента трения  $\mu$ , площадь контакта  $G$  и массу воду  $m$ .

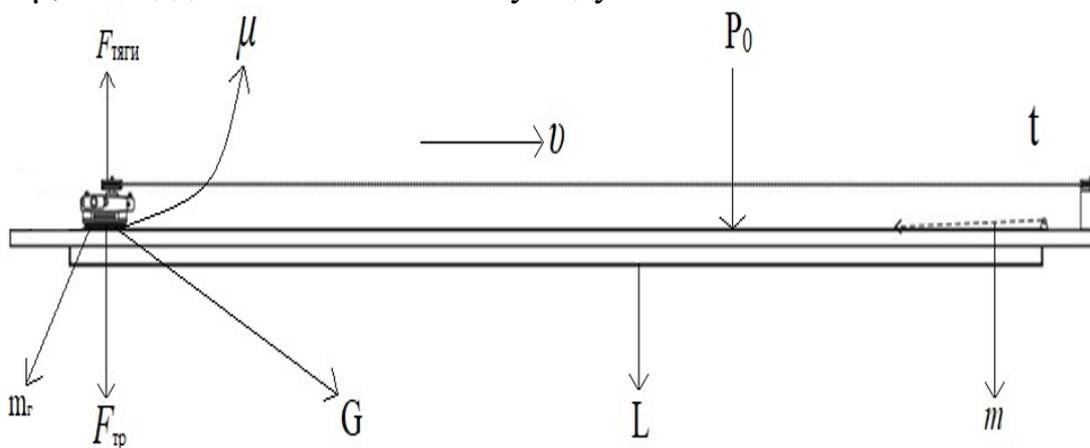


Рис.4. Физическая модель процесса очистки ОП ФЭМ

При моделировании этого процесса были учтены следующие факторы:  
Модель трения:

$$F_{\text{тр}} = \mu \cdot N, \quad (1)$$

где  $F_{\text{тр}}$  – сила трения (Н);  $\mu$ – коэффициент трения (-);  $N$ –нормальная сила (Н).

Масса воды:

$$N = P + mg, \quad (2)$$

где  $m$ –масса поролона после впитывания воды (кг).

Уравнение движения:

$$F_{\text{движ}} = F_{\text{тяги}} - F_{\text{тр}} = m_{\text{г}}f \quad (3)$$

Уменьшение трения:

$$\mu(t) = \mu_0 e^{-\alpha t}, \quad (4)$$

где  $\mu_0$ - начальное значение коэффициента трения.

Эффективная очистки:

$$t_{\text{очистки}} = \frac{L}{v}, \quad (5)$$

где  $L$ -длина ФЭМ (м);  $v$ -скорость движения поролона (м/с),  $v = v_0 + ft$ .

С учётом вышеприведенных зависимостей получим следующее уравнение:

$$F_{\text{тяги}} - (\mu_0 e^{-\alpha t})(P + m_0 g) = m_{\Gamma} f(t), \quad (6)$$

где  $F_{\text{тяги}}$  – сила тяги электродвигателя (Н);  $g$  – ускорение свободного падения (м/с<sup>2</sup>).

Представим, что устройство очистки как одна система, определим нормальную силы, действующей в этой системе:

$$N(t) = P + m(t)g, \quad (7)$$

где  $m(t)$ - масса поролона в момент времени  $t$ .

Теперь составим для системы дифференциальное уравнение движения:

$$m_{\Gamma} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F_{\text{тяги}} - \mu(t)N(t), \quad (8)$$

где  $\frac{d^2 x(t)}{dt^2}$  – ускорение поролона;  $x(t)$ -положение поролона в момент  $t$ .

Представим, что воды поступает на ОП ФЭМ со скоростью  $q$ :

$$m(t) = \begin{cases} m_{\Gamma} + qt, & \text{если } qt \leq m_0 \\ m_{\Gamma} + m_0, & \text{если } qt > m_0 \end{cases} \quad (9)$$

С учётом вышеприведенных зависимостей составим полное дифференциальное уравнение для системы:

$$m_{\Gamma} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F_{\text{тяги}} - \mu_0 e^{-\alpha t} (P + (m_{\Gamma} + \min(qt, m_0))g) \quad (10)$$

Для решения этого уравнения интегрируем пройденный путь по скорости:

$$x(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau = \int_0^t \left( \frac{F_{\text{тяги}} - \mu_0 e^{-\alpha \tau} (P + (m_{\Gamma} + \min(q\tau, m_0))g)}{m_{\Gamma}} \right) d\tau \quad (11)$$

С помощью этой модели 11 воспользуемся при определении расхода энергии, которая необходима для очистки ОП ФЭМ:

$$W_{\text{движ}} = \int_0^T F_{\text{движ}} v(t) dt, \quad (12)$$

где  $F_{\text{движ}}$  – результирующая сила, приводящая в движение поролон (Н),  $F_{\text{движ}} = F_{\text{тяги}} - \mu(t) \cdot N(t)$ ;  $W$  – количество энергии, необходимая для очистки ОП ФЭМ (Дж).

Если учтём результирующую силу, которая приводит в действие поролон:

$$W_{\text{движ}} = \int_0^T (F_{\text{тяги}} - \mu_0 e^{-sqt} (P + (m_r + \min(qt, m_0))g)) (v_0 + ft) dt \quad (13)$$

Если учтём параметры БО, то нормальная сила:

$$N = g \cdot m_{\text{влаж}} = g \cdot \left( 0.007 + 0.007x \frac{M}{2} \right) \quad (14)$$

А сила трения приобретает следующий вид:

$$F_{\text{тр}} = g \cdot \mu_0 e^{-\alpha M} = g \cdot \left( 0.007 + 0.007x \frac{M}{2} \right) \quad (15)$$

Если  $P_0$  это начальное давление, действующая на ОП ФЭМ, то нормальная сила:

$$N = P_0 \cdot G \quad (16)$$

Количество энергии, которая необходима для приведения в движение БО:

$$W_{\text{движ}} = \int_0^T (\mu \cdot N) v(t) dt \quad (17)$$

Если движение происходит с постоянной скоростью, энергия определяется по следующему:

$$W_{\text{движ}} = (\mu \cdot N) \cdot v \cdot T \quad (18)$$

Если учесть зависимость трения от расхода воды, энергия определяется по следующему:

$$W_{\text{движ}} = (\mu_0 e^{-\alpha M} \cdot N) \cdot P_0 \cdot G \cdot v \cdot T \quad (19)$$

Если учесть зависимость времени очистки от длины и скорости, энергия определяется по следующему:

$$W = \mu_0 e^{-\alpha M} \cdot P_0 \cdot G \cdot L \quad (20)$$

Таким образом из формулы 20 можно определить затрат энергии, которая необходима для очистки ОП ФЭМ от пыли.

Приводится пример практического расчета параметров УО. С учётом характеристик выбранного ФЭМ HANWHA (мощностью 250 Вт), выполнен расчеты, которые основаны на технико-эксплуатационные показатели разработанного УО. Для расчетов использовались размеры типового ФЭМ  $\sim 1,7 \times 1,0$  м ( $S=1,67\text{ м}^2$ ) и параметры УО (масса,  $t_{\text{очистки}}$  цикла, потребляемая мощность и др.). При вычислениях также учитывались зависимости из математической модели, чтобы подтвердить выбранные оптимальные режимы. Масса УО составляет  $m \sim 10$  кг и не превышает допустимую дополнительную нагрузку на ФЭМ и монтажную конструкцию, поэтому УО безопасно интегрируется с выбранным модулем. Габаритные размеры составляет 1,7 м на 1,0 м. Конструкция очистителя соответствует размерам ФЭМ: ширина БО соответствует ширине модуля ( $\sim 1,0$  м).

Таким образом, УО не выходит за габариты ФЭМ и легко крепится на ней.

Удельная масса на 1 м<sup>2</sup> поверхности: рассчитывается как отношение массы системы к площади очищаемой ОП. Площадь выбранного ФЭМ  $S=1,67\text{ м}^2$ . Тогда масса рассчитывается по следующему:

$$m_{\text{уд}} = \frac{m_{\text{устр}}}{S_{\text{оч}}} = \frac{10 \text{ кг}}{1.67\text{ м}^2} \approx 5,98 \text{ кг/м}^2 \quad (21)$$

Из значения удельной массы видно, что дополнительный вес, приходящийся на единицу площади ФЭМ, небольшой. Для сравнения, собственный вес самого ФЭМ составляет  $\sim 11,4$  кг/м<sup>2</sup>.

Таким образом, УО увеличивает нагрузку на ФЭМ на величину менее чем на 50% от её своего веса, что не создает опасных механических напряжений.

Выходные параметры работ УО. Расход воды на 1 м<sup>2</sup> (л/м<sup>2</sup>): для влажной очистки в устройстве имеется насос, который качает воду на ОП ФЭМ. Экспериментальные наблюдения показали, что на один цикл очистки одного ФЭМ требуется малое количество воды. Для одного цикла значение объема вода был принят 0,3 л. Удельный расход воды на единицу площади ФЭМ определяется по следующему:

$$q_{\text{вода}} = V_{\text{ц}} \cdot S = 0.3\text{ л} \cdot 1.67\text{ м}^2 = 0.501 \text{ л/м}^2 \quad (22)$$

Данный показатель достаточно оптимальный: менее 0,5 л на каждый квадратный метр ОП.

Расход энергии на 1 м<sup>2</sup> (Вт·ч/м<sup>2</sup>): Энергопотребление ЭД и насоса во время работы УО составляет  $P=25-30$  Вт. Среднее значение мощности составляет 35 Вт, которая необходима для движения БО по ОП ФЭМ. Один цикл очистки длится  $t=24$  секунд, то есть  $t=24/3600=0,00667$  часа. Энергия, затрачиваемая устройством за один цикл, определяется по следующему:

$$W_{\text{ц}} = P \cdot t = 35 \cdot 0.00667 \text{ ч} \approx 0.23345 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \quad (23)$$

Этот расход энергии на единицу площади ФЭМ определяется по следующему:

$$W_{\text{эн}} = W_{\text{ц}} \cdot S = 1.67 \text{ м}^2 \cdot 0.23345 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \approx 0.3898 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 \quad (24)$$

Для очистки 1 м<sup>2</sup> ФЭМ требуется примерно 0,3898 Вт·ч энергии, что равно 0,2338 кДж. Модуль за 24 секунды при E=1000 Вт/м<sup>2</sup> генерирует 1,7 Вт·ч ЭЭ (250 Вт×0,00667 ч), что больше затрат энергии для очистки. Математическая модель показывает, что оптимизация увлажнения снижает затраты энергии: небольшое количество воды уменьшает силу трения и работа двигателя минимизируется при q=0,4–0,5 л/м<sup>2</sup>.

Таким образом, рассчитанный расход энергии ~0,3898 Вт·ч/м<sup>2</sup> подтверждает энергоэффективность разработанного УО.

В четвертой главе диссертации под названием **“Экспериментальные исследования по применению эффективных устройств очистки оптических поверхностей фотоэлектрических модулей с учётом климатических факторов”** приведены результаты экспериментальных исследований запылённой и очищенной ФЭМ в натуральных условиях, также проведена технико-экономическая оценка разработанного устройства.

Экспериментальные исследования проводились на учебно-лабораторном гелио-полигоне кафедры «Возобновляемые источники энергии» Ташкентского государственного технического университета. В качестве испытуемых модулей применены два идентичных поликристаллических ФЭМ HANWHA мощностью 250 Вт. Оба модуля были установлены под углом ~25° к горизонту и ориентированы на юг, обеспечивая сопоставимые условия освещённости. Один из ФЭМ служил в качестве эталона «запылённым» (далее – НФЭМ, неочищенный модуль), второй – оборудовался разработанным устройством очистки и регулярно очищался (далее – ОФЭМ, очищенный модуль).

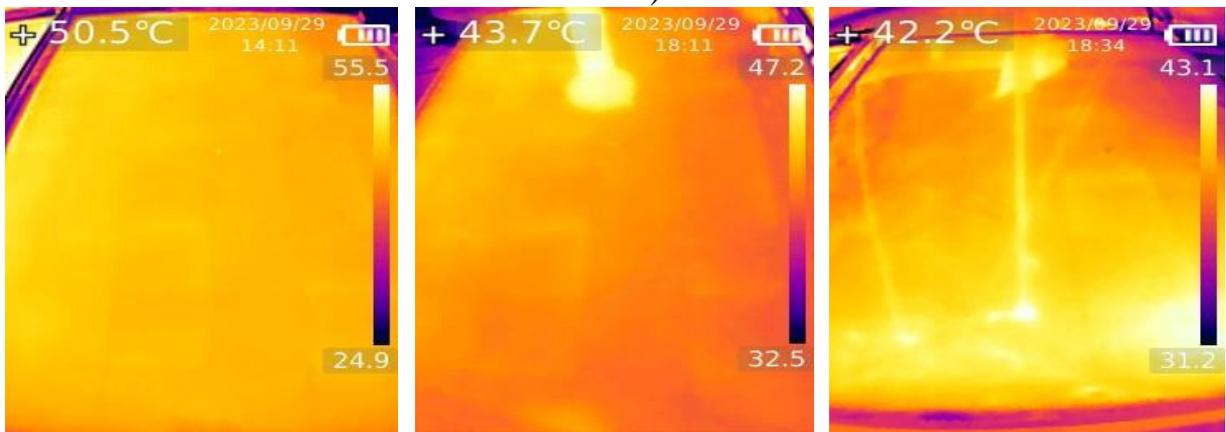
Для измерения электрических параметров использовалось сертифицированное оборудование. В частности, I<sub>кз</sub>, I<sub>мрр</sub>, U<sub>мрр</sub>, U<sub>х.х.</sub>, P<sub>вых</sub> и КПД (η) ФЭМ определялись с помощью портативного евро тестера METREL Mi 3108, который имеет погрешность ±1,5%. Одновременно измерялись следующие метеорологические параметры: E<sub>p</sub> – солнечная радиация (пиранометр SPM DT-1307, ±10 Вт/м<sup>2</sup>), температура окружающей среды (T<sub>окр</sub>) и относительная влажность воздуха (Y<sub>вв</sub>) (электронные датчики), а также выполнялась термография ОП ФЭМ с инфракрасной камерой UNI-T (±2 °C).

На Рис.5 представлен процесс проведения экспериментальных исследований запылённой и очищенной ФЭМ.



Рис.5. Процесс проведения экспериментальных исследований УО  
 На Рис.6-8 представлены результаты, полученные при  
 экспериментальных исследований ФЭМ.

а)



б)

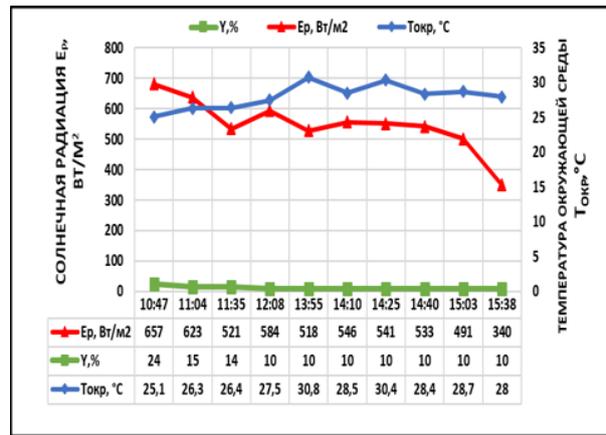


Рис.6. Временные зависимости температуры на ОП ФЭМ: а – запылённый; б – очищенный

Разница температур на ОП по данным тепловизора составила в среднем  $\sim 2,1$  °С: температура НФЭМ была выше. Уменьшение нагрева ОФЭМ показывает о снижении тепловых потерь и потенциальном увеличении её срока службы при регулярной очистке.



а)

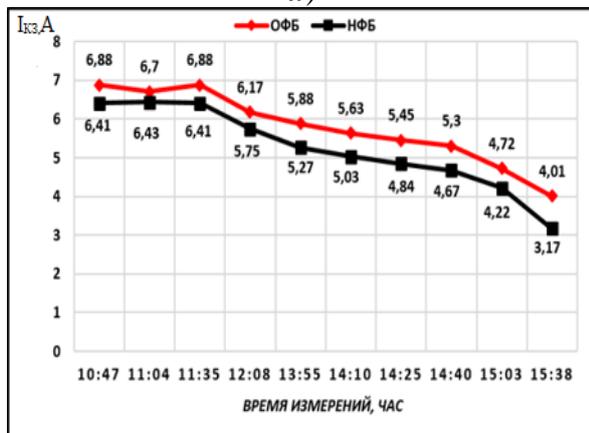


б)

Рис.7. Временные зависимости метеопараметров: а-среднесуточная концентрация пыли в воздухе города Ташкента за 2023 год; б- солнечная радиация, температура и влажность воздуха

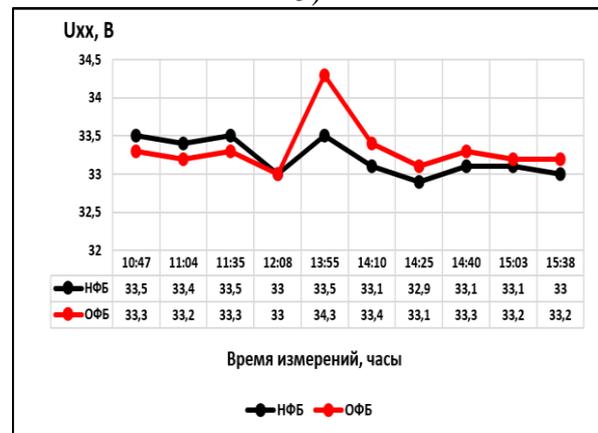
Из рис.7а видно, что в указанный период запыленность воздуха превышала санитарную норму многократно. Например, 03.09.2023 концентрация достигала  $\sim 2$  мг/м<sup>3</sup>, что более чем в 13 раз выше нормы. В день эксперимента погодные условия характеризовались с высокой температурой воздуха ( $T_{\text{ОКР.МАХ}} = 30,8$  °С,  $T_{\text{ОКР.МИН}} = 25,1$  °С) и очень низкой относительной влажностью ( $Y_{\text{CP}} \approx 12,3$  %). Плотность потока солнечного излучения в течение дня варьировалась от 340 до 657 Вт/м<sup>2</sup>.

а)



в)

б)



г)

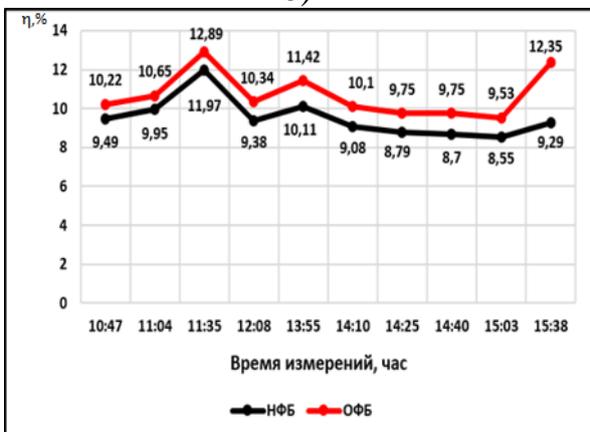
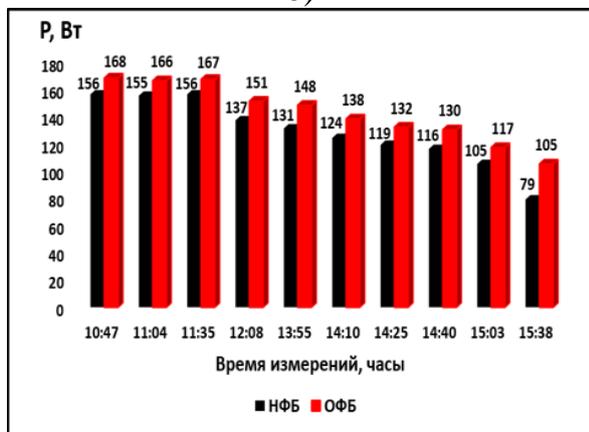


Рис.8. Временные зависимости параметров ФЭМ: а- ток короткого замыкания; б- напряжение холостого хода; в-выходная мощность; г-КПД (относительный)

Как видно из Рис.8, при равных условиях ОФЭМ вырабатывал больше энергии, чем НФЭМ. Например, в 10:47 при  $E \approx 657 \text{ Вт/м}^2$ ,  $T_{\text{окр}} = 25,1 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $Y = 23 \%$ ,  $I_{\text{кз}}$  НФЭМ был равен 6,41 А, а  $I_{\text{кз}}$  ОФЭМ составил 6,88 А, что выше на  $\approx 7,33 \%$ . Соответственно, в этот же момент  $P_{\text{вых}}$  запыленного модуля была 156 Вт, у очищенного был равен  $\sim 168 \text{ Вт}$ , т.е. больше на  $\approx 7,69 \%$ . Относительный КПД ( $\eta$ ) модуля при наличии пыли также существенно падала: разница  $\eta$  между ОФЭМ и НФЭМ в 10:47 достигала  $\approx 7,69 \%$  (в пользу очищенного модуля). В среднем, регулярная очистка ОП ФЭМ приводит к увеличению выходных параметров на 5–10 % относительно неочищенного состояния. В частности, по совокупности измерений:  $I_{\text{кз}}$  возрастает на  $\approx 8,3 \%$ ,  $P_{\text{вых}}$  – на  $\approx 7,9 \%$ , а относительный  $\eta$  – на  $\approx 7,8 \%$  по сравнению с запылённым модулем. Одновременно средняя температура очищенного ФЭМ снижается на  $\approx 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , чем температура неочищенного модуля с запыленной поверхностью.

На Рис.9 приведена сравнение модели: точки, полученные экспериментально, ложатся на модельную кривую, где можно увидеть, что коэффициент корреляции ( $R^2 = 0,9886$ ) близко к 1.

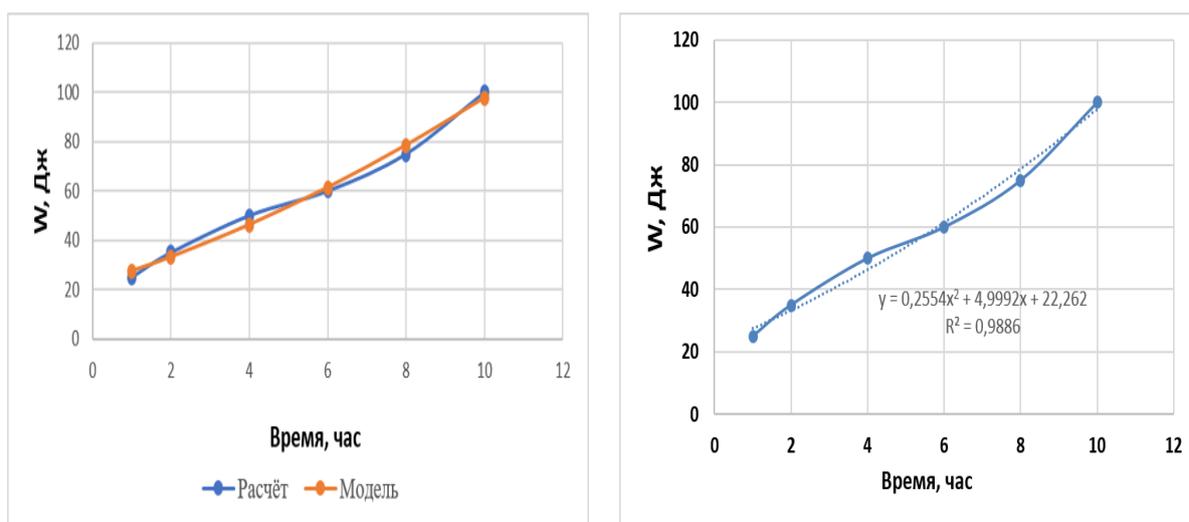


Рис.5. Сравнение математической модели с экспериментальными результатами

Математическая модель показала высокую точность в предсказании динамики системы. Совпадение результатов с экспериментальными данными показывает о корректности учёта коэффициента трения.

Таким образом, подтверждено, что регулярная очистка ФЭМ в условиях высокого пылевого загрязнения необходима для поддержания их эффективности на должном уровне.

В таблице 1 приведены результаты расчётов, проведённых с целью технико-экономической оценки разработанного УО. Расчёты проведены для фотоэлектрической установки мощностью 100 кВт, содержащей 400 ФЭМ по 250 Вт, где среднегодовая снижение потерь от запыления составляет 8%. Для расчёта приняты удельные нормы:  $\sim 0,376 \text{ м}^3$  природного газа или  $\sim 0,345 \text{ кг}$  угля на 1 кВт·ч; при сжигании 1  $\text{м}^3$  газа выделяется  $\sim 2,1 \text{ кг CO}_2$ , 1 кг угля –  $\sim 3,6 \text{ кг CO}_2$ .

Таблица 1

Годовой эффект от применения УО на ФЭС мощностью 100 кВт

Показатель	Значение без УО	Значение с УО	Экономия/прирост
Генерации ЭЭ, кВт·ч/год	11000	11880	+8800 (+8 %)
Сэкономленный природный газ*, м <sup>3</sup> /год	4136	4467	3309 м <sup>3</sup>
Сэкономленный уголь*, кг/год	3795	4099	3036 кг
Предотвращённые выбросы CO <sub>2</sub> *, кг/год	8686–13890	9381–15002	6949–10919**
Экономия средств (условно), \$/год	3600	3924	3400–3500

Как видно из таблицы, УО на 100 кВт ФЭС может увеличить годовую выработку ЭЭ на 8800 кВт·ч (прирост 8 % относительно варианта без очистки). Если это дополнительное количество ЭЭ было выработано на ТЭС, то в год пришлось сжечь 3309 м<sup>3</sup> газ или 3036 кг уголь и, в свою очередь, в год 9381–15002 кг CO<sub>2</sub> выбрасывалось в окружающую среду. В результате предотвращённые выбросы CO<sub>2</sub> оцениваются в диапазоне 6949–10919 кг в год, в зависимости от вида условного топлива. Следует учесть, что приведенные цифры – оценочные, основанные на 8% увеличении генерации. В территориях с более высокой запыленностью или при менее частой естественной очистке (дождями) эффект может быть ещё значительнее.

Таким образом, технико-экономические расчёты подтверждают целесообразность использования разработанного УО: устройство окупается за счёт прироста генерации электроэнергии и продления срока службы ФЭМ, а также приносит экологическую пользу, уменьшая углеродный след энергетики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, проведенных в диссертации доктора философии (PhD) на тему «Усовершенствование устройства очистки оптической поверхности фотоэлектрических модулей от пыли», представлены следующие выводы:

1. Проведён обзор современного состояния технологий очистки ОП ФЭМ от пыли, а также оценку климатических факторов и нормативной базы. В результате установлено, что запыление ОП ФЭМ приводит к потерям генерации ЭЭ до 30–50 % за несколько месяцев, а существующие методы (механические, роботизированные, бесконтактные, защитные покрытия) обладают существенными ограничениями (высокие затраты, износ, высокая

потребность в воде и др.), что обуславливает необходимость разработки усовершенствованного и автоматизированного УО, адаптированного для засушливых и пыльных условий.

2. Усовершенствовано устройство очистки ОП ФЭМ от пыли на основе электромеханической системы и энергосберегающего электродвигателя. В результате, предложенное техническое решение позволило осуществить один цикл очистки ФЭМ, которая имеет мощность 250 Вт, за 24 с при энергопотреблении 25–30 Вт («Устройство для очистки солнечной панели», Патент № SAP 20240036 от 20.03.2024);

3. Усовершенствована математическая модель процесса очистки ФЭМ, основанная на системе дифференциальных уравнений движения и учитывающая динамические характеристики электродвигателя, силу и коэффициент трения. В результате создана возможность оптимизировать расход воды и определить количество энергии, которая необходима для очистки ОП ФЭМ;

4. Проведены экспериментальные исследования усовершенствованного устройства очистки в условиях засушливого и высоко-запыленного климата. В результате определено, что ток короткого замыкания очищенного ФЭМ, по сравнению с неочищенным модулем, был увеличен в среднем на 8,3 %, выходная мощность на 7,9 % и относительный КПД на 7,7 %, а температура на её ОП была снижена в среднем на 2 °С;

5. Усовершенствован метод и алгоритм, позволяющий сократить затрат времени для очистки ОП ФЭМ от пыли. В результате, по сравнению с аналогом, создана возможность сократить время работы устройства очистки в среднем в 8 раз;

6. Результаты исследования внедрены на ООО «SUN-HIGHTECH». В результате, создана возможность за год получить дополнительно 11880 кВт·час «зеленую» ЭЭ, сэкономить газ на 4466,88 м<sup>3</sup>, уголь на 4098,6 кг, соответственно снизить выбросы CO<sub>2</sub> на 9380,44 кг и 14754,96 кг, где ожидаемый экономический эффект составляет 65 284 818 (шестьдесят пять миллион двести восемьдесят четыре тысячи восемьсот восемнадцать) сумов.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARDING DEGREE OF DOCTOR OF  
SCIENCE DSc.03/10.12.2019.T.03.03 AT TASHKENT STATE  
TECHNICAL UNIVERSITY NAMED AFTER ISLAM KARIMOV**

---

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY NAMED AFTER  
ISLAM KARIMOV**

**SODIQOV TIMUR BAKHTIYOROVICH**

**IMPROVEMENT OF A DEVICE FOR CLEANING THE OPTICAL  
SURFACE OF PHOTOVOLTAIC MODULES FROM DUST**

**05.05.06 - Power installations on the basis of renewable energy**

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)  
ON TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent–2025**

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) in technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher education, sciences and innovations of the Republic of Uzbekistan with number B2024.2.PhD/T3166

The dissertation has been prepared at Tashkent State Technical University.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (uzbek, russian and english (resume)) on the website (www.tdtu.uz) and on the website of «ZiyoNet» Information and education portal (www.ziynet.uz).

**Academic leader:** **Zikrillayev Khayrulla Fatxullayevich**  
Candidate of physical and mathematical sciences,  
Associate Professor

**Official opponents:** **Uzakov Gulom Norboyevich**  
Doctor of technical sciences, Professor

**Rasakhodzhaev Bakhramzhan Sabirovich**  
Candidate of technical sciences, Professor

**Leading organization:** **Physical-Technical institute AS RUz**

The defense of dissertation will take place on "5" 06 2025 at 10:30 o'clock at of the meeting of the Scientific council with the number DSc.03/10 12 2019 T 03 03 under Tashkent State Technical University named after Islam Karimov. (Address: 100095, Tashkent, University str., 2. Phone: (99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32, e-mail: [tstu\\_info@tdtu.uz](mailto:tstu_info@tdtu.uz).)

The doctoral dissertation can be reviewed at the Information-Resource Center of Tashkent State Technical University (Registration number - 23). (Address: 100095, Tashkent, University str., 2. Tel.: (99871) 227-03-41.)

Abstract of the dissertation was distributed on "20" 05 2025 year  
(mailing record № 7 on "19" 05 2025)



**K.R. Allaev**  
Chairman of Scientific Council  
Awarding Scientific Degrees,  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Academic

**LU. Rakhmonov**  
Acting Scientific secretary of  
Scientific Council on awarding Scientific Degrees,  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**R.P. Babakhodjaev**  
Chairman of the scientific seminar Scientific council  
on awarding Scientific Degrees  
Doctor of Technical Sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The purpose of the study** is a to increase the efficiency of photovoltaic modules by improving the construction of the device for cleaning their optical surface from dust.

### **Research objectives:**

Conduct an analysis of existing methods and technical solutions used in cleaning optical surfaces of photovoltaic modules from dust;

select and justify the design elements of the cleaning device taking into account climatic conditions;

to improve the mathematical model of the cleaning process of optical surfaces of photovoltaic modules;

create a prototype of a cleaning device and conduct experimental studies to assess its efficiency and energy feasibility of use;

conduct a technical, economic and environmental assessment of the improved treatment device.

**The object** of the study is devices and technological solutions designed to clean the optical surface photovoltaic modules from dust.

**The subject of the research** is the processes and methods for increasing the efficiency of cleaning the optical surface photovoltaic modules using automated electromechanical systems, as well as the principles of their improvement and adaptation to climatic conditions.

**Research methods.** During the research the research used Runge-Kutta methods, modeling of the cleaning process, modern mathematical calculation, measurement and comparative analysis.

**Reliability of research results.** The reliability of research results is confirmed by the adequacy of the results obtained through multiple experimental studies and measurements using high-precision measuring instruments, as well as the validity of their implementation in practice.

**Publication research results.** In total 21 scientific paper have been published on the topic of the dissertation, including 1 patent for an industrial design. 8 articles were published in scientific publications recommended by the Higher Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of the main results of doctoral dissertations, including 6 republican and 2 foreign scientific journals and collections included in the Scopus database, 8 international and these were published in materials of republican conferences and received a software certificate for 2 ECM.

**Approbation of research results.** The results of this work were discussed at 2 international and 6 national scientific and practical conferences and seminars.

**The scope and structure of the dissertation.** The content of the dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the dissertation is 121 pages.

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

**I бўлим (I часть; I part)**

1. Содиков Т.Б., Зикриллаев Х.Ф. Устройство для очистки оптической поверхности солнечной панели от пыли // Вестник МЭИ. - Москва, 2024. - №6. - С. 68-75 (05.00.00 № 17).

2. Содиков Т.Б. Разработка устройства для очистки фотоэлектрической батареи от пыли // Международный журнал Альтернативная энергетика и экология. - Саров, 2024. № 7. - С.12-20 (05.00.00 № 11).

3. Zikrillayev Kh.F., Sodiqov T.B., Y.M. Qurbanov Analysis if the efficiency of a solar panel equipped with a cleaning system // Научно-технический журнал «Problems of energy and sources saving». - Ташкент, 2023. - № 4. -pp. 339-343 (05.00.00 № 21).

4. Зикриллаев Х.Ф., Содиков Т.Б. Разработка мехатронной части устройства очистки солнечной панели // Научно-технический журнал «Проблемы энерго- и ресурсосбережения». - Ташкент, 2023. Специальный выпуск, - № 84. - С. 346-350 (05.00.00 № 21).

5. Зикриллаев Х.Ф., Содиков Т.Б. Первая фотоэлектрическая станция и анализ её текущего состояния // Научно-технический журнал ФерПИ. – Фергана, 2023. - Том 27, - № 6. - pp. 101-106 (05.00.00 № 20).

6. Zikrillayev Kh.F., Sodiqov T.B. Study of the structural and mechanical part of the Hanwha solar panel // Scientific-technical journal of FerPI. - Fergana, 2023. - Vol. 27, - № 5. - pp. 146-150 (05.00.00 № 20).

7. Зикриллаев Х.Ф., Содиков Т.Б. Исследование солнечной панели бес системой очистки от пыли // Научно-технический журнал ФерПИ. - Фергана, 2024. – Том 28, - № 1. - С. 159-163 (05.00.00 № 20).

8. Zikrillayev Kh.F., Sodiqov T.B. Selection of water pump, reservoir and nozzles for a solar panel cleaning device // Scientific-technical journal of FerPI. - Fergana, 2024. - Vol. 28, - № 3. - С. 113-117 (05.00.00 № 20).

**II бўлим (Часть II; Part II)**

9. Содиков Т.Б., Зикриллаев Х.Ф. Устройство для очистки солнечной панели // Центр по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство-патент на промышленный образец № SAP20240036 от 20.03.2024.

10. Zikrillayev Kh. Sodiqov T. Improving energy efficiency of solar panels // E3S Web of Conference 401, 04021 (2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340104021>, (**Scopus**)

11. Zikrillayev Kh. Sodiqov T. Study on main characteristics of Hanwha solar panels // E3S Web of Conference 434, 01037 (2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401037>, (**Scopus**)

12. Зикриллаев Х.Ф., Содиков Т.Б. Электродвигатель – основаная часть устройства очистки солнечных панелей. // «Физика ва электрониканинг

долзарб муаммолари» мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани материаллари. Тошкент шаҳри, 2023 йил 3-4 ноябрь. 190-191 б.

13. Зикриллаев Х.Ф., Содиков Т.Б. Анализ электрических параметров солнечной панели с встроенной системой очистки // Сборник избранных статей Международной научной конференции «Перспективные исследования в современном мире». Санкт-Петербург, 14 октября 2023 год. - С.16-17.

14. Зикриллаев Х.Ф., Содиков Т.Б. Результаты экспериментов фотоэлектрической батареи снабженной системой очистки // Материалы II-Международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро- и нанoeлектроники». Ташкент, 27-28 октября 2023 год. - С.288-290.

15. Zikrillayev Kh. Sodiqov T. Volt-ampere characteristics of Hanwha solar panel // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг III республика илмий анжумани (ЁОФТРИА - III) материаллари. Тошкент, 15-июнь 2023 йил. 166-168 б.

16. Зикриллаев Х.Ф., Содиков Т.Б. Анализ параметров солнечной батареи оснащенной с системой очистки // Сборник тезисов второй научно-практической конференции для молодых учёных «Современные проблемы физики, энергетики и теплотехники». Ташкент, 23 ноября 2023 год. - С.122-124.

17. Зикриллаев Х.Ф., Содиков Т.Б. Основные характеристики фотоэлектрической батареи Hanwha // «Фан ва техника тараққиётида интеллектуал ёшларнинг тутган ўрни» мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани илмий ишлар тўплами. Тошкент, 19-20 апрел 2024 йил. 435-437 б.

18. Зикриллаев Х.Ф., Содиков Т.Б. Выбор источника питания для проведения экспериментов солнечной панели, снабженной системой очистки // «Фан ва техника тараққиётида интеллектуал ёшларнинг тутган ўрни» мавзусидаги Республика илмий-амалий анжумани илмий ишлар тўплами. Тошкент, 19-20 апрел 2024 йил. 443-445 б.

19. Зикриллаев Х.Ф., Содиков Т.Б. Автоматизация процесса очистки солнечной панели оснащенной системой очистки // Сборник избранных статей международной научной конференции «Инновационные исследования в современном мире». Санкт-Петербург, 20 апреля 2024 год. - С.20-21.

20. Зикриллаев Х.Ф., Содиокв Т.Б. Программа по автоматизации процесса работы устройства очистки солнечной панели // Центр по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU №35259 23.03.2024.

21. Содиокв Т.Б., Зикриллаев Х.Ф., Курбанов Ю.М. Програмное обеспечение для автоматизации устройства очистки солнечной панели // Центр по интеллектуальной собственности РУз. Свидетельство DGU №38259 18.05.2024.

Автореферат «ТЕХНИКА ФАНЛАРИ ВА ИННОВАЦИЯ» илмий  
журналида таҳририягида таҳрирдан ўтказилиб, узбек, рус ва инглиз  
тиллардаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди

Бичими: 84x60 1/16, «Times New Roman» гарнитураси.  
Рақамли босма усулда босилди.  
Шартли босма табоғи: 2,79 (48 бет). Адади 50. Буюртма №

Нашриёт гувоҳномаси №АІ 242, 04.10.2013 й  
«VNESHINVESTPROM» МЧЖ босмахонасида чоп этилган.  
Босмахона манзили: Тошкент шаҳри, Навоий кўчаси, 30.