ВАЗОРАТИ ЭНЕРГЕТИКА ВА ЗАХИРАҲОИ ОБИ ҶУМҲУРИИ ТОҶИКИСТОН

ДОНИШКАДАИ ЭНЕРГЕТИКИИ ТОҶИКИСТОН

ВБД 621.311.243:519.87

Ба ҳуқуқи дастнавис



Давлатзода Абуфазл Нусратулло

МОДЕЛСОЗИИ КОРИ НЕРУГОҲҲОИ БАРҚИ ОФТОБӢ БО ДАРНАЗАРДОШТИ ТАЪСИРИ ОМИЛҲОИ ҲАРОРАТӢ

АВТОРЕФЕРАТИ

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмии номзади илмҳои техникӣ аз рӯйи ихтисоси 2.3. Энергетика ва электротехника (2.3.4. Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ)

Кӯшониён – 2026

Диссертатсия дар кафедраи манбаъҳои алтернативии энергияи Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон иҷро шудааст.

Роҳбари илмӣ:	**Бурҳонзода Илҳом Бурҳон,** номзади илмҳои техникӣ, дотсент, мудири кафедраи манбаъҳои алтернативии энергияи Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон
Муқарризони расмӣ:	**Юлдашев Зарифджан Шарифович,** доктори илмҳои техникӣ, дотсент, профессори кафедраи барқикунонӣ ва автоматикунонии кишоварзии Донишгоҳи аграрии Тоҷикистон ба номи Шириншоҳ Шоҳтемур
	Қасобов Лоиқ Сафарович, номзади илмҳои техникӣ, дотсенти кафедраи неругоҳҳои электрикии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М. С. Осимӣ
Муассисаи пешбар:	Институти масъалаҳои об, гидроэнергетика ва экологияи Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон

Ҳимояи диссертатсия санаи «_24_» ноябри соли 2026, соати 10:00 дар ҷаласаи Шурои диссертатсионии 6D.KOA-083 назди Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон бо суроғаи: 735162, Ҷумҳурии Тоҷикистон, вилояти Хатлон, ноҳияи Кӯшониён, шаҳраки Бохтариён, кӯчаи Н. Хусрав, 73 баргузор мегардад. E-mail: messi.ilhom@yandex.ru

Бо диссертатсия ва автореферати он дар китобхона ва сомонаи Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон https://tpei.tj/shuroi-dissertatsioni/ шинос шудан мумкин аст.

Автореферат «____» _____с. 2026 ирсол шудааст.

И.в. котиби илмии
Шурои диссертатсионӣ,
номзади илмҳои техникӣ Юсуфӣ Д.Ю.

МУҚАДДИМА

Мубрамии мавзуи таҳқиқот. Имрӯз рушди соҳаи энергетика торафт бештар ба ҷустуҷӯ ва истифодаи манбаъҳои боэътимод ва гуногуни истеҳсоли неруи барқ вобаста мегардад. Дар чунин шароит манбаъҳои барқароршавандаи энергия яке аз самтҳои муҳими рушди энергетика ба ҳисоб рафта, дар байни онҳо энергетикаи офтобии фотоэлектрикӣ мавқеи хос пайдо кардааст. Рушди ин самт, пеш аз ҳама, ба мавҷудияти иқтидори назарраси техникии энергияи офтоб, коҳиш ёфтани арзиши таҷҳизоти фотоэлектрикӣ ва васеъ гардидани доираи истифодаи неругоҳҳои барқи офтобӣ алоқаманд мебошад.

Қисми зиёди афзоиши иқтидорҳои нави энергетикӣ ба соҳаҳои офтобӣ ва бодӣ рост меояд. Ин раванд аз тағйир ёфтани сохтори энергетикаи ҷаҳонӣ ва афзоиши истифодаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия шаҳодат медиҳад.

Мувофиқи маълумоти Агентии байналмилалии энергетика (IEA), соли 2025 афзоиши солонаи иқтидори насбшудаи неругоҳҳои барқи офтобии фотоэлектрикӣ барои нахустин бор аз 600 ГВт зиёд гардида, иқтидори умумии насбшудаи онҳо дар ҷаҳон тақрибан ба 2800 ГВт расидааст. Ҳамзамон, энергетикаи офтобии фотоэлектрикӣ зиёда аз чор се ҳиссаи афзоиши иқтидорҳои нави манбаъҳои барқароршавандаи энергияро таъмин намудааст.

Ҳамин тариқ, истеҳсоли неруи барқ тавассути неругоҳҳои барқи офтобии фотоэлектрикӣ дар шароити муосир ҳамчун яке аз самтҳои афзалиятноки рушди энергетика боқӣ мемонад.

Барои Ҷумҳурии Тоҷикистон рушди энергетикаи офтобӣ аҳамияти махсус дошта, ба зарурати минбаъд гуногунсамт намудани сохтори истеҳсоли неруи барқ, баланд бардоштани эътимоднокии барқтаъминкунӣ ва самаранок истифода бурдани иқтидори назарраси радиатсияи офтобӣ вобаста мебошад. Шароити табиӣ-иқлимии ҷумҳурӣ бо давомнокии зиёди давраи тобиши офтоб ва сатҳи баланди радиатсияи офтобӣ тавсиф шуда, дар як сол зиёда аз 300 рӯзи офтобӣ ба қайд гирифта мешавад. Ин омилҳо барои рушди энергетикаи офтобӣ ва афзоиши иқтидорҳои истеҳсолӣ тавассути сохтмон ва ба истифода додани неругоҳҳои барқи офтобӣ заминаи мусоид фароҳам меоранд.

Мубрамии масъалаи мавриди таҳқиқ дар шароити гузариши Ҷумҳурии Тоҷикистон аз истифодаи алоҳидаи дастгоҳҳои фотоэлектрикии иқтидорашон хурд ба рушди неругоҳҳои барқи офтобии миқёси калон боз ҳам бештар мегардад. Соли 2025 дар ноҳияи Ашти вилояти Суғд ва ноҳияи Ҷайҳуни вилояти Хатлон сохтмони неругоҳҳои барқи офтобӣ бо иқтидори умумии насбшудаи 500 МВт оғоз гардид.

Ҳангоми истифодаи неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ дар шароити иқлими Тоҷикистон таъсири маҷмуи омилҳои иқлимӣ ва истифодабарӣ ба фаъолияти онҳо ба назар мерасад. Аз ҷумла, ба омилҳои асосӣ шиддатнокии радиатсияи офтобӣ, ҳарорати муҳити атроф, тағйирёбии он дар давоми шабонарӯз ва сол, инчунин ғуборолудшавии сатҳи модулҳои фотоэлектрикӣ (МФЭ) дохил мешаванд.

Барои минтақаҳои ҷанубии ҷумҳурӣ ҳамбастагии радиатсияи баланди офтобӣ бо ҳарорати нисбатан баланд ва иқлими хушк хос мебошад. Чунин шароити иқлимӣ метавонад ба нишондиҳандаҳои энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ таъсири назаррас расонад.

Омили ҳароратӣ бевосита ба нишондиҳандаҳои энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ таъсир мерасонад. Ҳангоми баланд шудани ҳарорати модул параметрҳои асосии электрикии он, пеш аз ҳама, шиддат ва иқтидори максималӣ тағйир меёбанд. Дар натиҷа самаранокии воқеии энергетикии модулҳо метавонад аз қиматҳои дар тавсифоти техникии онҳо овардашуда ба таври назаррас фарқ кунад. Ҳамзамон, шиддатнокии баланди радиатсияи офтобӣ, ки ба афзоиши истеҳсоли неруи фотоэлектрикӣ мусоидат мекунад, боиси зиёд шудани гармшавии модулҳо низ мегардад.

Дар шароити иқлими гарм ҳарорати модулҳои фотоэлектрикӣ метавонад аз қимати стандартии 25 °C, ки ҳангоми муайян намудани параметрҳои электрикии онҳо дар шароити стандартии санҷиш (STC) қабул шудааст, ба таври назаррас баландтар гардад. Афзоиши ҳарорати корӣ боиси коҳиш ёфтани иқтидори истеҳсолии модулҳо мегардад ва вобаста ба

шароити истифодабарӣ талафоти иқтидор, ки дар натиҷаи таъсири ҳарорат ба вуҷуд меояд, метавонад ба 15-25 % расад.

Аз ин рӯ, ҳисобҳое, ки танҳо ба шароити стандартии STC асос меёбанд, на ҳамеша имкон медиҳанд, ки ҳаҷми воқеии истеҳсоли неруи барқ аз ҷониби неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ дар шароити иқлими гарм бо дақиқии зарурӣ арзёбӣ карда шавад. Дар шароити воқеии истифодабарӣ ҳарорати модулҳои фотоэлектрикӣ дар давоми шабонарӯз ва сол тағйир ёфта, ин тағйирот ба параметрҳои электрикии модулҳо ва ҳаҷми неруи барқи истеҳсолшаванда таъсири бевосита мерасонад.

Яке аз омилҳои дигари муҳими истифодабарии таҷҳизоти фотоэлектрикӣ дар шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон ғуболудшавии сатҳи модулҳо мебошад. Ҷамъшавии ғубор миқдори радиатсияи офтобиро, ки ба сатҳи модули фотоэлектрикӣ мерасад, коҳиш дода, дар натиҷа метавонад боиси кам шудани истеҳсоли неруи барқ гардад.

Аз ин лиҳоз, барои арзёбии боэътимоди самаранокии энергетикии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ танҳо ба назар гирифтани иқтидори насбшудаи таҷҳизот, радиатсияи офтобӣ ва параметрҳои меъёрии модулҳои фотоэлектрикӣ кифоя нест. Зарур аст, ки вобастагии миқдории байни параметрҳои иқлимӣ, ҳарорати модулҳо, тағйирёбии хусусиятҳои электрикии онҳо, талафоти энергетикӣ ва истеҳсоли воқеии неруи барқ муайян карда шавад.

Ин масъала ҳангоми лоиҳакашӣ ва истифодабарии неругоҳҳои барқи офтобии иқтидорашон калон аҳамияти бештар пайдо мекунад. Бо афзоиши иқтидори насбшуда ҳатто фарқияти нисбатан хурд байни нишондиҳандаҳои ҳисобӣ ва шароити воқеии истифодабарӣ метавонад ба тафовути назаррас байни истеҳсоли солонаи пешбинишуда ва воқеии неруи барқ оварда расонад. Аз ин рӯ, баланд бардоштани дақиқии ҳисобкунии нишондиҳандаҳои энергетикӣ ҳам дар марҳилаи лоиҳакашӣ ва ҳам дар раванди истифодабарии неругоҳҳои барқи офтобӣ вазифаи муҳими илмӣ ва амалӣ ба ҳисоб меравад.

Дар раванди ҳисобкунӣ, бинобар ин, на танҳо параметрҳои номиналии модулҳои фотоэлектрикӣ, балки тағйироти воқеии ҳарорат ва дигар шароити иқлимӣ низ бояд ба назар гирифта шаванд. Истифодаи моделсозӣ имкон медиҳад, ки таъсири чунин тағйирот ба фаъолияти модулҳои фотоэлектрикӣ ва тамоми неругоҳи барқи офтобӣ арзёбӣ карда шавад. Татбиқи воситаҳои муосири моделсозӣ барои таҳқиқи реҷаҳои гуногуни кори неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ, муайян намудани таъсири ҳарорат ба нишондиҳандаҳои энергетикӣ, арзёбии талафоти энергетикӣ, инчунин таҳлили таъсири ҷойгиркунӣ ва самтгирии модулҳо имконият фароҳам меорад. Чунин равиш барои баланд бардоштани дақиқии ҳисобҳои истеҳсоли интизории неруи барқ заминаи зарурӣ фароҳам месозад.

Барои Ҷумҳурии Тоҷикистон зарурати ҳалли ин масъала ба ҳамбастагии иқтидори баланди офтобӣ бо шароити нисбатан мураккаби истифодабарии таҷҳизоти фотоэлектрикӣ вобаста мебошад. Аз як тараф, сатҳи баланди радиатсияи офтобӣ имкониятҳои назаррасро барои истеҳсоли неруи барқ фароҳам меорад. Аз ҷониби дигар, дар шароити воқеии истифодабарӣ самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ танҳо аз шиддатнокии радиатсияи офтобӣ вобаста нест. Ба кори онҳо ҳарорати баланди муҳити атроф, гармшавии худи модулҳо ва ҷамъшавии ғубор дар сатҳи онҳо низ таъсири назаррас мерасонанд.

Аз ин рӯ, ҳангоми ҳисобкунии кори неругоҳи барқи офтобӣ ба назар гирифтани омилҳои мазкур, пеш аз ҳама тағйирёбии ҳарорат, аҳамияти муҳим дорад, зеро ҳарорат бевосита ба иқтидори истеҳсолии модулҳо ва ҳаҷми воқеии истеҳсоли неруи барқ таъсир мерасонад.

Ҳамзамон муҳимияти таҳқиқоти мазкур ба татбиқи лоиҳаҳои бузурги энергетикаи офтобӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон бо иқтидори умумии 500 МВт вобаста мебошад. Дар чунин шароит дақиқии ҳисобҳои энергетикӣ аҳамияти махсус пайдо мекунад, зеро эътимоднокии арзёбии ҳаҷми воқеии истеҳсоли неруи барқ ва самаранокии дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ бевосита ба натиҷаҳои ин ҳисобҳо вобаста аст. Аз ин лиҳоз, такмили усулҳои моделсозии математикӣ бо дарназардошти таъсири ҳарорат барои рушди энергетикаи офтобии Ҷумҳурии Тоҷикистон дорои аҳамияти ҳам илмӣ ва ҳам амалӣ

мебошад. Истифодаи моделҳои мукаммал имкон медиҳад, ки таъсири шароити ҳароратӣ ба фаъолияти таҷҳизоти фотоэлектрикӣ дақиқтар муайян карда шавад.

Ҳамин тариқ, муҳимияти таҳқиқот бо хусусиятҳои истифодабарии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ дар шароити иқлими Ҷумҳурии Тоҷикистон муайян мегардад. Дар шароити ҳарорати баланд тағйирёбии ҳолати ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ метавонад ба нишондиҳандаҳои воқеии энергетикии онҳо таъсири назаррас расонад. Истифодаи моделҳои математикии дорои дарназардошти ҳолати ҳароратии модулҳо имкон медиҳад, ки ҳаҷми истеҳсоли неруи барқ бо дақиқии бештар муайян, талафоти энергетикии вобаста ба гармшавии модулҳо ошкор ва ҳангоми интихоби параметрҳои таҷҳизот, лоиҳакашӣ ва истифодабарии минбаъдаи дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ ба ҳисоб гирифта шаванд.

Бо дарназардошти гуфтаҳои боло, таҳқиқи кори неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ дар асоси моделсозии математикӣ ва компютерӣ бо мақсади арзёбии самаранокии энергетикии онҳо ва ба назар гирифтани таъсири омилҳои ҳароратӣ дар шароити иқлими гарм, аз ҷумла шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон, масъалаи муҳими илмӣ-техникӣ буда, аҳамияти назарраси амалӣ дорад.

Дараҷаи таҳқиқи мавзуи илмӣ. Масъалаҳои рушди энергетикаи офтобӣ, баланд бардоштани самаранокии энергетикии низомҳои фотоэлектрикӣ ва таъсири омилҳои иқлимӣ ба истеҳсоли неруи барқ дар корҳои олимони ватанӣ ва хориҷӣ мавриди таҳқиқ қарор гирифтаанд. Ба масъалаҳои умумии истифодаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия корҳои Д.С. Стребков [1], П.П. Безруких [2], В.В. Елистратов [3] ва дигар муҳаққиқон бахшида шудаанд. Ҷанбаъҳои моделсозии низомҳои фотоэлектрикӣ ва арзёбии самаранокии онҳо дар таҳқиқоти J. Duffie [4], Tze-Zhang Ang [5] ва J.L. Holechek [6] баррасӣ шудаанд.

Масъалаҳои вобастагии ҳарорати модулҳои фотоэлектрикӣ аз радиатсияи офтобӣ, ҳарорати муҳити атроф ва шароити истифодабарӣ дар корҳои H. Thomas [7], E. Skoplaki [8] ва J.A. Palyvos [9] омӯхта шудаанд. Ҷанбаъҳои моделсозии математикӣ ва пешгӯии истеҳсоли неруи барқ аз неругоҳҳои фотоэлектрикӣ дар таҳқиқоти М.Г. Тягунов [10], С.Г. Обухов [11] ва И.А. Плотников [12] инъикос ёфтаанд. Ҳамзамон, масъалаҳои талафоти энергетикӣ дар натиҷаи ифлосшавии сатҳи модулҳо дар корҳои L. Michel [13], M.L. Adekanbi [14] ва P. Dixit [15] таҳқиқ шудаанд.

Таъсири ҳарорати баланд ба параметрҳои электрикӣ ва самаранокии модулҳои фотоэлектрикӣ, инчунин роҳҳои коҳиш додани талафоти вобаста ба ҳарорат дар таҳқиқоти A. Hasan [16], H.M.S. Bahaidarah [17], И.М. Кирпичникова [18] ва дигарон баррасӣ гардидааст. Самаранокии низомҳои фотоэлектрикӣ дар минтақаҳои дорои иқлими гарм дар корҳои С.Е. Шеклеин [19], В.И. Велкин [20] ва О.В. Григораш [21] низ мавриди омӯзиш қарор гирифтааст.

Таҳлили самтҳои зикргардида нишон медиҳад, ки масъалаи умумии моделсозии низомҳои фотоэлектрикӣ ва таъсири омилҳои иқлимӣ ба фаъолияти онҳо омӯхта шудаанд. Бо вуҷуди ин, арзёбии маҷмуии таъсири ҳарорати кории модулҳо ба нишондиҳандаҳои энергетикии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ дар шароити иқлимии Ҷумҳурии Тоҷикистон таҳқиқоти иловагиро талаб мекунад. Аз ҷумла, зарурати муқоисаи натиҷаҳои моделсозӣ бо маълумоти таҷрибавӣ ва муайян намудани тағйирёбии нишондиҳандаҳои энергетикӣ боқӣ мемонад.

Вобаста ба ин таҳқиқоти диссертатсионӣ ба омӯзиши масъалаи мазкур тавассути моделсозии математикӣ, таҳқиқоти таҷрибавӣ ва истифодаи барномаҳои компютерӣ равона гардидааст. Мавқеи таҳқиқот дар арзёбии таъсири ҳарорат ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳо ва асоснок намудани имкониятҳои баланд бардоштани эътимоднокии ҳисобҳои истеҳсоли неруи барқ дар шароити иқлими гарм ифода меёбад. Натиҷаҳои таҳқиқот метавонад барои такмили усулҳои арзёбии самаранокии энергетикии неругоҳҳои барқи офтобӣ дар Ҷумҳурии Тоҷикистон аҳамияти илмӣ ва амалӣ дошта бошанд.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо) ва мавзуъҳои илмӣ. Таҳқиқоти диссертатсионӣ бо самтҳои афзалиятноки сиёсати давлатии Ҷумҳурии Тоҷикистон дар

соҳаи энергетика, рушди манбаъҳои барқароршавандаи энергия ва илмҳои дақиқ алоқаманд буда, ба мақсаду вазифаҳои «Стратегияи миллии рушди Ҷумҳурии Тоҷикистон барои давраи то соли 2030», Қонуни Ҷумҳурии Тоҷикистон «Дар бораи энергетика» аз 19 июли соли 2022, № 1909, «Барномаи рушди манбаъҳои барқароршавандаи энергия барои солҳои 2023-2027», ки бо қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 1 марти соли 2023, № 51 тасдиқ шудааст, инчунин қарори Ҳукумати Ҷумҳурии Тоҷикистон аз 30 июли соли 2020, № 427 «Дар бораи эълон намудани бистсолаи омӯзиш ва рушди илмҳои табиӣ, дақиқ ва риёзӣ» мутобиқ мебошад.

Мавзуи диссертатсия, ки ба моделсозии кори неругоҳҳои барқи офтобӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ ва баланд бардоштани самаранокии истифодаи энергияи офтоб равона шудааст, бевосита ба самтҳои афзалиятноки мазкур алоқаманд буда, барои рушди асосҳои илмӣ-методии истифодаи самараноки энергияи офтоб дар Ҷумҳурии Тоҷикистон аҳамияти илмӣ ва амалӣ дорад.

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

Мақсади таҳқиқоти диссертатсионӣ аз таҳқиқи таъсири шароити ҳароратӣ ба фаъолияти модулҳои фотоэлектрикӣ ва дар ин замина таҳия намудани моделҳои математикӣ иборат аст, ки барои бо дақиқии бештар муайян намудани нишондиҳандаҳои энергетикӣ ва ҳаҷми истеҳсоли неруи барқ аз ҷониби неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ имкон фароҳам меоранд.

Вазифаҳои таҳқиқот. Барои расидан ба мақсади гузошташуда иҷрои вазифаҳои зерин пешбинӣ шудааст:

1. Таҳлили ҳолати муосир ва усулҳои асосии моделсозии неругоҳҳои барқи офтобӣ, муайян намудани омилҳои таъсиррасон ба самаранокии энергетикии онҳо бо дарназардошти таъсири ҳароратӣ.
2. Таҳқиқи таҷрибавии таъсири ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ ба нишондиҳандаҳои энергетикии онҳо ва муайян намудани вобастагии иқтидори истеҳсолии модулҳо аз ҳарорат.
3. Моделсозӣ ва арзёбии нишондиҳандаҳои энергетикии неругоҳи барқи офтобӣ бо истифода аз маҷмуи барномавии PVsyst дар асоси параметрҳои техникии низом ва шароити иқлими минтақаи таҳқиқот.
4. Таҳияи модели математикии кори дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ ва татбиқи он дар муҳити MATLAB/Simulink.
5. Арзёбии самаранокии ҳифзи ҳароратӣ, таҳияи методикаи ба ҳисоб гирифтани таъсири ҳарорат ба параметрҳои модулҳои фотоэлектрикӣ ва пешниҳод намудани тавсияҳо барои шароити иқлими гарм, аз ҷумла шароити Ҷумҳурии Тоҷикистон.

Объекти таҳқиқот. Неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ ва модулҳои фотоэлектрикии онҳо дар шароити қиматҳои гуногуни ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати корӣ.

Мавзуи таҳқиқот. Таъсири шароити ҳароратӣ ба тавсифоти электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ ва истеҳсоли неруи барқ, инчунин моделҳои математикӣ ва усулҳои ҳисобии арзёбии ин таъсир ва қонуниятҳои муайяншудаи тағйирёбии он.

Асосҳои назариявии таҳқиқот. Асоси методологии таҳқиқотро муқаррароти назарияи табдилёбии фотоэлектрикии радиатсияи офтоб ба неруи барқ, инчунин қонуниятҳои тағйирёбии тавсифоти электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ (МФЭ) ҳангоми таъсири ҳарорат ташкил медиҳанд. Барои муайян намудани вобастагиҳои регрессионӣ усули квадратҳои хурдтарин истифода шудааст. Таҳқиқи равандҳои кории неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ ва арзёбии миқдории таъсири ҳарорат тавассути моделсозии имитатсионӣ дар асоси моделҳои математикии таҳияшуда анҷом дода шудааст.

Навгонии илмӣ. Дар таҳқиқоти гузаронидашуда натиҷаҳои нави илмии зерин бори аввал ба даст оварда шудаанд:

1. Қонуниятҳои таъсири ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии онҳо муайян гардида, вобастагии иқтидори истеҳсолии модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорати корӣ муқаррар карда шуд.

2. Модели математикии кори модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ таҳия гардид, ки имкон медиҳад тағйирёбии параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳо вобаста ба ҳарорати корӣ арзёбӣ карда шавад.

3. Вобастагии миқдории ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорати муҳити атроф муайян карда шуд, ки имкон медиҳад таъсири ҳарорат ҳангоми моделсозии кори онҳо ба ҳисоб гирифта шавад. Вобастагии бадастомада барои такмили модели дастгоҳи фотоэлектрикӣ дар муҳити MATLAB/Simulink истифода гардида, тағйирёбии иқтидори истеҳсолӣ ва истеҳсоли неруи барқ дар шароити гуногуни ҳароратӣ арзёбӣ карда шуд.

4. Равиши ҳисобӣ барои муайян намудани таъсири ҳарорат ба модулҳои фотоэлектрикӣ пешниҳод гардид, ки арзёбии миқдории тағйирёбии параметрҳои электрикӣ ва энергетикии онҳоро таъмин намуда, имкон медиҳад талафоти ҳароратӣ ҳангоми қиматҳои гуногуни ҳарорати корӣ муайян карда шаванд.

5. Модели математикии ҳифзи ҳароратии модулҳои фотоэлектрикӣ таҳия ва самаранокии он дар шароити ҳарорати баланди муҳити атроф арзёбӣ карда шуд. Муайян гардид, ки истифодаи ҳифзи ҳароратӣ имкон медиҳад ҳарорати сатҳи модули фотоэлектрикӣ то 3,53 °C паст карда шуда, таъсири ҳарорати баланд ба нишондиҳандаҳои энергетикии он коҳиш дода шавад.

Нуктаҳои ба ҳимоя пешниҳодшаванда:

1. Вобастагиҳои таҷрибавӣ ва регрессионии ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорати муҳити атроф барои ду ҳолати истифодабарӣ бо термомуҳофизат ва бе он дар асоси натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии саҳроӣ муайян карда шуда, қонуниятҳои тағйирёбии ҳарорати кории модулҳо вобаста ба ҳарорати муҳити атроф муқаррар гардидаанд. Натиҷаҳои бадастомада барои арзёбии таъсири омилҳои ҳароратӣ ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ дар шароити иқлимии Ҷумҳурии Тоҷикистон замина фароҳам меоранд.

2. Методикаи ҳисоб ва арзёбии параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ ва истифодаи термомуҳофизат таҳия гардида, модели математикии кори модул дар муҳити MATLAB/Simulink татбиқ карда шудааст. муайян карда шудааст, ки ҳангоми ҳарорати муҳити атрофи 45 ^{o}C истифодаи термомуҳофизат ҳарорати кории модулро аз 62,13 ^{o}C то 58,6 ^{o}C паст намуда, фарқияти 3,53 ^{o}C-ро таъмин менамояд. Ин натиҷа таъсири термомуҳофизатро ба беҳтар шудани шароити ҳароратии кори модули фотоэлектрикӣ нишон медиҳад.

3. Модели тақлидии низоми автономии фотоэлектрикӣ барои шароити иқлимии ноҳияи Кӯшониён дар муҳити барномавии PVsyst таҳия гардида, таъсири параметрҳои иқлимӣ, омилҳои ҳароратӣ ва сарбории электрикӣ ба нишондиҳандаҳои энергетикии низоми арзёбӣ карда шудааст. дар асоси натиҷаҳои моделсозӣ конфигуратсияи техникии низоми фотоэлектрикии автономӣ асоснок гардида, тавозуни энергетикӣ ва ҳиссаи энергияи офтобӣ дар пӯшонидани сарбории энергетикии истеъмолкунандагон муайян карда шудаанд.

Аҳамияти назариявӣ ва амалии таҳқиқот. Аҳамияти назариявии таҳқиқот бо ба даст овардани вобастагиҳои ҳисобӣ муайян мегардад, ки имкон медиҳанд таъсири ҳарорат ҳангоми таҳлили тавсифоти электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ ба назар гирифта шавад. Қонуниятҳои муайяншудаи таъсири ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати корӣ ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ, вобастагиҳои таҷрибавӣ ва регрессионӣ, инчунин методикаи ҳисоб ва арзёбии параметрҳои модулҳо бо дарназардошти таъсири ҳарорат заминаи илмиро барои баланд бардоштани дақиқии моделсозӣ ва арзёбии истеҳсоли неруи барқ аз ҷониби неругоҳҳои барқи офтобӣ фароҳам меоранд. Модели таҳияшуда дар муҳити MATLAB/Simulink ва натиҷаҳои моделсозӣ дар маҷмуи барномавии PVsyst метавонанд барои таҳқиқи таъсири ҳарорати корӣ ва талафоти

ҳароратӣ ба нишондиҳандаҳои электрикӣ ва энергетикии низомҳои фотоэлектрикӣ истифода шаванд.

Аҳамияти амалии таҳқиқот дар имконияти истифодаи натиҷаҳои бадастомада ҳангоми лоиҳакашӣ, ҳисобкунӣ ва арзёбии самаранокии энергетикии неругоҳҳои барқи офтобӣ дар шароити иқлими гарм, аз ҷумла дар Ҷумҳурии Тоҷикистон, ифода меёбад. Методикаи пешниҳодшуда имкон медиҳад, ки параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти ҳарорати воқеии корӣ ҳисоб карда шуда, таъсири ҳифзи ҳароратӣ ба фаъолияти онҳо арзёбӣ гардад. Моделсозӣ дар маҷмуъҳои барномавии PVsyst ва MATLAB/Simulink метавонад барои интихоби параметрҳои таҷҳизоти асосии неругоҳи барқи офтобӣ, арзёбии истеҳсоли неруи барқ бо дарназардошти сарбории истеъмолкунандагон ва таҳлили талафоти энергетикӣ истифода шавад. Натиҷаҳои таҳқиқот инчунин барои таҳияи тавсияҳои илмӣ-амалӣ оид ба баланд бардоштани самаранокии низомҳои фотоэлектрикӣ дар минтақаҳои дорои ҳарорати баланди муҳити атроф аҳамияти амалӣ доранд.

Дараҷаи эътимоднокии натиҷаҳои диссертатсия. Эътимоднокии натиҷаҳои кори диссертатсионӣ бо истифодаи натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии саҳроӣ, коркарди регрессионии маълумоти таҷрибавӣ ва моделсозии математикӣ дар муҳитҳои барномавии PVsyst ва MATLAB/Simulink таъмин карда шудааст. Эътимоднокии натиҷаҳои ҳисобӣ тавассути муқоисаи реҷаҳои кори модулҳои фотоэлектрикӣ бо термомуҳофизат ва бе он, инчунин арзёбии таъсири термомуҳофизат ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модул санҷида шудааст. Мутобиқати натиҷаҳои таҷрибавӣ, ҳисобӣ ва моделсозӣ, инчунин истифодаи муштараки PVsyst ва MATLAB/Simulink барои арзёбии нишондиҳандаҳои энергетикӣ ва параметрҳои электрикию ҳароратии низоми фотоэлектрикӣ эътимоднокии натиҷаҳои бадастомадаро тасдиқ менамояд.

Мутобиқати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ. Диссертатсия ба бандҳои зерини шиносномаи ихтисоси илмии 2.3. Энергетика ва электротехника (2.3.4. Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ)» мутобиқат мекунад:

Банди 2. «Таҳиясозии асосҳои илмӣ (равишҳо) ҷиҳати таҳқиқоти хусусиятҳои умумӣ, шартҳои фаъолият ва усулҳои ҳисоб, алгоритмҳо ва барномаҳои интихобӣ ва муносибсозии параметрҳо, нишондиҳандаҳои сифат ва реҷаҳои кории системаҳои энергетикӣ, муҷтамаъҳо, дастгоҳҳои энергетикӣ дар асоси сӯзишвориҳои органикӣ, алтернативӣ ва намудҳои энергияи барқароршаванда фаъолияткунанда...» – дар қисми таҳқиқоти таҷрибавии таъсири ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии онҳо, муайян намудани вобастагиҳои ҳароратӣ ва таҳияи методикаи ҳисоб ва арзёбии параметрҳои модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири ҳарорат ва термомуҳофизат;

Банди 4. «Таҳиясозӣ, таҳқиқот ва такмили технологияҳои мавҷуда ва азхудкунии технологияҳо ва таҷҳизоти нав барои истеҳсоли неруи барқ ва гармӣ, истифодаи сӯзишвориҳои органикӣ ва алтернативӣ, ва намудҳои энергияи барқароршаванда....тақвияти» «эътимоднокӣ ва дарозмуддат кардани муҳлати хизмати элементҳои системаҳои энергетикӣ....» – дар қисми таҳқиқ ва такмили технологияҳои истифодаи энергияи офтобӣ тавассути арзёбии таъсири ҳарорати баланд ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ, таҳияи термомуҳофизат ва муайян намудани таъсири он ба ҳарорати корӣ ва нишондиҳандаҳои энергетикии модулҳо бо мақсади коҳиш додани талафоти ҳароратӣ ва баланд бардоштани самаранокии энергетикии кори онҳо;

Банди 11. «Моделсозии математикӣ, таҳқиқоти ададӣ ва табиии равандҳои физикию химиявӣ ва кории ҷоришаванда дар системаҳои энергетикӣ ва дастгоҳҳо, ки бо сӯзишвориҳои органикӣ, алтернативӣ ва манбаъҳои энергияи барқароршаванда кор мекунанд...» – дар қисми таҳияи модели математикии кори модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ, моделсозии кори онҳо дар муҳити барномавии MATLAB/Simulink ва моделсозии кори неругоҳи барқи офтобӣ дар муҳити барномавии

PVsyst бо дарназардошти шароити иқлимӣ, сарбории электрикии истеъмолкунандагон, истеҳсоли неруи барқ ва талафоти энергетикӣ.

Саҳми шахсии довталаби дараҷаи илмӣ дар муайян намудани мақсад ва вазифаҳои таҳқиқот, гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавӣ, ҷамъоварӣ ва коркарди маълумоти саҳроӣ, муайян намудани вобастагиҳои таҷрибавии параметрҳои электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорат, таҳияи модели математикӣ ва методикаи ҳисоб бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ ифода меёбад. Довталаб дар таҳияи модели термомуҳофизат, моделсозӣ дар муҳитҳои барномавии PVsyst ва MATLAB/Simulink, таҳлил ва муқоисаи натиҷаҳои таҷрибавию ҳисобӣ, инчунин таҳияи хулосаҳо ва тавсияҳои илмӣ-амалӣ бевосита саҳмгузор мебошад.

Тасвиб ва амалисозӣ. Натиҷаҳои асосии таҳқиқоти диссертатсионӣ дар конференсияҳои илмӣ-амалии ҷумҳуриявӣ ва байналмилалӣ мавриди апробатсия қарор гирифтаанд. Қисме аз натиҷаҳои таҳқиқот дар конференсияҳои ба масъалаҳои энергетика, рушди инноватсионӣ ва муҳандисии саноатӣ бахшидашуда, ки солҳои 2023–2026 дар Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Федератсияи Россия баргузор гардиданд, пешниҳод ва муҳокима карда шуданд.

Аз ҷумла, натиҷаҳои таҳқиқот дар конференсияҳои байналмилалии «Энергетика: состояние и перспективы развития» (Душанбе, 2023, 2025), «Развитие энергетики Таджикистана в период независимости» (Душанбе, 2025), «Цифровая индустриализация и развитие энергетики глазами ученых и исследователей» (Кӯшониён, 2025), инчунин дар IV конференсияи умумироссиягии ҷавонон бо иштироки байналмилалӣ «Булатовские чтения» (Томск, 2024) ва конференсияи байналмилалии ICIEAM 2026 (Сочи, 2026) пешниҳод ва мавриди баррасӣ қарор гирифтанд.

Натиҷаҳои таҳқиқот инчунин дар конференсияҳои илмӣ-амалии Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон ва Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ мавриди муҳокима қарор гирифтаанд.

Интишорот аз рӯйи мавзуи диссертатсия. Натиҷаҳои таҳқиқоти анҷомдодашуда дар 17 нашрияи илмӣ инъикос ёфтаанд. Аз ҷумла, 5 мақола дар нашрияҳои илмии ба феҳристи Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Комиссияи олии аттестатсионии Федератсияи Россия шомилбуда ба нашр расидаанд, 1 нашрия дар маводи конференсияи илмӣ, ки дар пойгоҳҳои байналмилалии библиографии IEEE ва Scopus индексатсия мешавад, инчунин 11 нашрия дар маҷмуаи маводи конференсияҳои байналмилалии илмӣ нашр шудаанд.

Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия. Диссертатсия аз муқаддима, чор боб, хулоса, феҳристи адабиёт ва замимаҳо иборат мебошад. Ҳаҷми умумии кор 186 саҳифаи матни чопшударо ташкил медиҳад (аз ҷумла 152 саҳифа матни асосии диссертатсия). Маводи тасвирӣ ва маълумотии диссертатсия бо 43 расм ва 10 ҷадвал пешниҳод гардида, рӯйхати адабиёт 137 номгӯй ва замимаҳо 4 ададро дар бар мегиранд.

ҚИСМҲОИ АСОСИИ ТАҲҚИҚОТ

Дар муқаддима «муҳиммияти мавзуи таҳқиқот асоснок гардида, дараҷаи таҳқиқи масъала арзёбӣ шудааст; мақсад ва вазифаҳо, объект ва предмети таҳқиқот муайян карда шуда, навгонии илмӣ, асосҳои назариявӣ ва методологии таҳқиқот, аҳамияти назариявӣ ва амалии натиҷаҳои бадастомада, дараҷаи эътимоднокии онҳо, апробатсия ва татбиқи натиҷаҳои таҳқиқот, инчунин муқаррароти ба ҳимоя пешниҳодшаванда баён гардидаанд».

<u>Дар боби якум</u> «***Шарҳи таҳлилии усулҳои муосири моделсозии неругоҳҳои барқи офтобӣ***» «ҳолати муосири рушди энергетикаи офтобӣ», «усулҳои моделсозии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ, воситаҳои барномавии моделсозӣ, инчунин таъсири омилҳои иқлимӣ ба нишондиҳандаҳои энергетикии неругоҳҳои барқи офтобӣ» таҳлил карда шудаанд. Ҳадафи асосии таҳлил муайян намудани усулҳои мувофиқтарини моделсозӣ ва асоснок намудани зарурати ба назар гирифтани таъсири омилҳои ҳароратӣ ҳангоми арзёбии истеҳсоли воқеии неруи барқ аз ҷониби неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ мебошад.

Вазъи рушди энергетикаи офтобӣ. Дар ин қисмат равандҳои асосии рушди энергетикаи офтобӣ ва мавқеи он дар байни дигар манбаъҳои барқароршавандаи энергия баррасӣ шудаанд. Солҳои охир неругоҳҳои барқи офтобӣ ба таври васеъ истифода шуда истодаанд, ки ин раванд ба афзоиши талабот ба манбаъҳои нави истеҳсоли неруи барқ вобаста мебошад. Гузариш ба технологияҳои аз ҷиҳати экологӣ тоза ва ҷустуҷӯи манбаъҳои самараноктари энергия ба рушди босуръати энергетикаи офтобӣ мусоидат намудаанд. Мувофиқи маълумоти Агентии байналмилалии энергияи барқароршаванда (IRENA), то охири соли 2025 иқтидори умумии насбшудаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия дар ҷаҳон ба 5149 ГВт расида, дар давоми як сол 692 ГВт афзоиш ёфтааст.

Иқтидори насбшудаи энергетикаи офтобӣ ба 2392 ГВт расидааст, ки суръати баланди рушди ин соҳа ва саҳми назарраси онро дар афзоиши иқтидорҳои манбаъҳои барқароршавандаи энергия нишон медиҳад. Барои Ҷумҳурии Тоҷикистон рушди энергетикаи офтобӣ аҳамияти махсус дорад, зеро шароити табиӣ-иқлимии кишвар, давомнокии зиёди тобиши офтоб ва сатҳи баланди радиатсияи офтобӣ барои истифодаи васеи неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ имкониятҳои мусоид фароҳам меоранд. Ҳамзамон, дар диссертатсия таъкид шудааст, ки бо татбиқи лоиҳаҳои бузурги энергетикаи офтобӣ зарурати баланд бардоштани дақиқии ҳисоб ва пешгӯии истеҳсоли неруи барқ низ бештар мегардад.

Дар солҳои охир энергетикаи офтобӣ ҳиссаи худро дар иқтидори умумии насбшудаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия ба таври назаррас афзоиш додааст. Тибқи намудҳои истеҳсоли неруи барқ (расми 1), ба энергетикаи офтобӣ 2392 ГВт, ё тақрибан 47 % аз иқтидори умумии насбшудаи манбаъҳои барқароршавандаи энергия рост меояд. Ин нишондиҳанда энергетикаи офтобиро ҳамчун бузургтарин ва босуръат рушдёбандаи бахши энергетикаи барқароршаванда бо имконияти баланди тавсеаи минбаъда муаррифӣ менамояд.



Расми 1. – Сохтори иқтидори муқарраршудаи ҷаҳонии МБЭ аз рӯйи навъҳои истеҳсоли неруи барқ. Манбаъ: IRENA [22].

Усулҳои муосири моделсозии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ. Таҳлили адабиёти илмӣ ва натиҷаҳои таҳқиқоти анҷомдодашуда нишон медиҳад, ки барои моделсозии низомҳои фотоэлектрикӣ якчанд равишҳои асосӣ истифода мешаванд. Дар ин боб равишҳои физикӣ-математикӣ, оморӣ, имитатсионӣ ва гибридӣ (омехта) мавриди баррасӣ қарор гирифтаанд.

Равиши физикӣ-математикӣ имкон медиҳад равандҳои физикии дар модулҳои фотоэлектрикӣ ҷоришаванда бо дараҷаи баланди тафсилот ба назар гирифта шуда, ҳисобҳои дақиқ анҷом дода шаванд. Камбудии асосии ин равиш зарурати истифодаи ҳаҷми зиёди маълумоти ибтидоӣ ва хароҷоти нисбатан зиёди ҳисоббарорӣ мебошад.

Равиши оморӣ нисбатан сода буда, барои арзёбии фаврӣ ва пешгӯии нишондиҳандаҳо истифода мешавад, аммо натиҷаҳои он аз сифат ва пуррагии маълумоти ибтидоӣ ба таври назаррас вобаста мебошанд. Равиши имитатсионӣ имкон медиҳад динамикаи равандҳо дар вақт ба ҳисоб гирифта шуда, барои таҳлили реҷаҳои корӣ ва пешгӯии истеҳсоли неруи барқ истифода гардад. Равиши гибридӣ (омехта) имконият фароҳам меорад, ки бартариҳои якчанд равиш дар як модели ягона муттаҳид карда шаванд.

Барои равшантар нишон додани натиҷаҳои муқоисавии таҳлил, дар ҷадвали 1 тавсифи ҷамъбастии равишҳои баррасишуда пешниҳод шудааст.

Ҷадвали 1. Таҳлили муқоисавии усулҳои моделсозии неругоҳҳои фотоэлектрикӣ

Усулҳои моделсозӣ	**Бартариятҳо**	**Маҳдудиятҳо**	**Доираи татбиқ**
Физикию математическӣ	Дақиқии баланд, баҳисобгирии равандҳои физикӣ	Маълумоти муфассал ва захираҳои ҳисобиро талаб мекунад	Тадқиқоти илмӣ, оптимизатсияи параметрҳои неругоҳи офтобӣ
Оморӣ (Статистикӣ)	Осонии татбиқ, хароҷоти пасти ҳисоббарорӣ	Вобастагӣ аз сифати маълумот	Арзёбиҳои фаврӣ ва пешгӯиҳо
Тақлидӣ (Имитатсионӣ)	Баҳисобгирии динамикаи вақт	Мушкилии танзими моделҳо	Таҳлили реҷаҳои корӣ, пешгӯии истеҳсоли неру
Гибридӣ (Омехта)	Дақиқии баланд, мутобиқшавӣ	Мураккабии татбиқ	Таҳқиқоти муосир, низомҳои зеҳнӣ

Сохтори моделсозии неругоҳи барқи фотоэлектрикӣ. Дар боби якуми диссертатсия сохтори иерархии моделсозӣ мавриди таҳлил қарор гирифтааст. Раванди моделсозӣ метавонад аз сатҳи унсури алоҳидаи фотоэлектрикӣ ва модули фотоэлектрикӣ оғоз гардида, пайдарпай то сатҳи гурӯҳҳои модулҳои фотоэлектрикӣ, таҷҳизоти табдилдиҳандаи энергияи офтоб ба неруи барқ, низомҳои идоракунӣ ва захиракунии энергия ва дар ниҳоят то сатҳи ҳамгироии объект бо низоми энергетикӣ васеъ карда шавад.

Чунин равиши иерархӣ имкон медиҳад таъсири параметрҳои унсурҳо ва модулҳои алоҳида, талафот дар таҷҳизоти фотоэлектрикӣ, хусусиятҳои таҷҳизоти табдилдиҳанда ва шароити умумии истифодабарӣ пайдарпай таҳлил карда шаванд. Истифодаи ин равиш имкон медиҳад таъсири омилҳои асосӣ, аз ҷумла шароити иқлимӣ ва хусусиятҳои истифодабарӣ, ба назар гирифта шуда, дақиқии пешгӯии истеҳсоли неруи барқ баланд бардошта шавад.

Таҳлили воситаҳои барномавии моделсозӣ. Дар боби якум бо мақсади интихоби асоснок ва истифодаи минбаъда дар таҳқиқот воситаҳои муосири барномавии моделсозии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ муқоиса карда шудаанд (ҷадвали 2). Аз ҷумла, воситаҳои барномавии PVGIS, PVsyst, PV*SOL, HelioScope, SAM, MATLAB/Simulink ва HOMER Pro аз рӯйи таъйинот, имкониятҳои асосии ҳисобкунӣ, афзалиятҳо ва маҳдудиятҳои онҳо таҳлил гардидаанд.

Сохтори иерархии моделсозӣ дар расми 2 оварда шудааст. Дар расм сатҳҳои моделсозӣ аз элементҳои алоҳидаи фотоэлектрикӣ (ЭФЭ) ва модулҳо то ҳамгироии объект бо низоми энергетикӣ нишон дода шудаанд.



Расми 2. – Сохтори иерархии моделсозии неругоҳи барқи офтобӣ

Дар асоси таҳлили анҷомдодашуда ва арзёбии муқоисавии воситаҳои барномавии моделсозӣ, барои моделсозии неругоҳи барқи автономии фотоэлектрикӣ ҳамчун воситаҳои асосии таҳқиқот PVsyst ва MATLAB/Simulink интихоб гардиданд.

Дар бобҳои минбаъда натиҷаҳои моделсозии объекти таҳқиқот кори неругоҳи барқи автономии фотоэлектрикӣ пешниҳод карда мешаванд. Бо дарназардошти вазифаҳои гузошташуда, воситаҳои барномавии интихобшуда ба мақсад ва талаботи моделсозии анҷомдодашаванда бештар мувофиқ дониста шуданд.

Ҷадвали 2. Таҳлили муқоисавии воситаҳои барномавии моделсозии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ

Воситаҳои барномавӣ	**Самти асосии истифодабарӣ**	**Хусусиятҳои асосӣ**
PVGIS	Арзёбии иқлимӣ ва ибтидоии лоиҳа	Маълумоти метеорологӣ
PVsyst,	Лоиҳакашӣ ва моделсозии НБОФ	Ҳисоби муфассали энергетикӣ
PV*SOL	Ҳисобкунии НБОФ-и тақсимшудаи ҳамгирошуда ба бино	Моделсозии 3D
SAM	Таҳлили техникӣ-иқтисодӣ	Моделсозии молиявӣ (NPV, IRR, LCOE)
HOMER Pro	Низомҳои мустақил ва гибридӣ (омехта)	Оптимизатсияи сохтор

Таъсири омилҳои иқлимӣ ба кори неругоҳи барқи фотоэлектрикӣ. Қисми муҳими боби якум ба таҳлили омилҳои иқлимие бахшида шудааст, ки ба кори неругоҳи барқи фотоэлектрикӣ таъсир мерасонанд. Муайян карда шуд, ки ҳаҷми воқеии истеҳсоли неруи барқ аз радиатсияи офтобӣ, ҳарорати муҳити атроф, суръати шамол, абрнокӣ, намнокии ҳаво ва ифлосшавии сатҳи модулҳои фотоэлектрикӣ вобастагӣ дорад. Радиатсияи офтобӣ

ҳамчун манбаи асосии энергия бевосита сатҳи истеҳсоли неруи баркро муайян менамояд. Дар баробари ин, ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ ба параметрҳои электрикии онҳо таъсири мустақим мерасонанд. Барои минтақаҳои хушк ва ҷанубии Ҷумҳурии Тоҷикистон ҷамъшавии ғубор дар сатҳи модулҳо низ ҳамчун яке аз омилҳои муҳими пайдоиши талафоти энергетикӣ арзёбӣ мегардад.

Барои шароити шаҳри Бохтар параметрҳои мавсимии иқлимӣ таҳлил карда шуда, натиҷаҳои бадастомада дар ҷадвали 3 оварда шудаанд. Тибқи маълумоти ҷадвали 3, дар фасли тобистон радиатсияи офтобӣ ба 6,5-7,5 кВт·соат/м², ҳарорати муҳити атроф ба 28-38 °С ва суръати шамол ба 2,5-3,0 м/с мерасад. Натиҷаҳои бадастомада зарурати ба инобат гирифтани омили ҳароратиро ҳангоми моделсозии кори неругоҳҳои барқи фотоэлектрикӣ тасдиқ менамоянд.

Ҷадвали 3. Параметрҳои иқлими минтақаи истифодашаванда ҳамчун объекти таҳқиқотӣ

Параметрҳо	**Дар фасли зимистон**	**Дар фасли баҳор**	**Дар фасли тобистон**	**Дар фасли тирамоҳ**
Радиатсия (кВт·ч/м^2)	2,5-3,2	4,5-5,5	6,5-7,5	3,5-4,5
Ҳарорат (^{o}C)	8-2	12-20	28-38	15-25
Суръати шамол (м/с)	1,5-2,5	2,0-3,0	2,5-3,0	1,5-2,5

Яке аз омилҳое, ки ба самаранокии неругоҳҳои фотоэлектрикӣ таъсири манфӣ мерасонад ин ифлосшавӣ ё ҷанголудшавии сатҳи МФЭ ба ҳисоб меравад. Барои раванди ифлосиҳо ҳам модели хаттӣ ва ҳам модели экспоненсиалӣ пешниҳод шудаанд. Ҳамзамон, таъсири боришоти атмосферӣ ҳамчун механизми қисман ё пурра тоза намудани сатҳи модул ба ҳисоб гирифта шудааст. Дар натиҷаи модели умумии иқтидори истеҳсолии неругоҳи фотоэлектрикӣ пешниҳод гардида, дар он радиатсияи офтобӣ, ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ ва сатҳи ифлосшавӣ ба назар гирифта шудаанд.

Барои тавсифи миқдории ин таъсири ифлосшавӣ, зариби ифлосшавӣ ҷорӣ карда мешавад, ки коҳиши нисбии иқтидорро инъикос менамояд:

$$P_{eff}(t) = P_0(t) \cdot (1 - L_s(t)) \quad (1)$$

«Дар ин ҷо: $P_{eff}(t)$ – иқтидори воқеии неругоҳи фотоэлектрикӣ бо дарназардошти ифлосшавӣ, $P_0(t)$ – иқтидор ҳангоми тоза будани сатҳи модули офтобӣ», $L_s(t)$ – талафоти нисбӣ аз ифлосшавӣ.

Динамикаи ҷамъшавии ифлосиҳоро метавон дар шакли вобастагии хаттӣ ифода намуд:

$$L_s(t) = k \cdot t \quad (2)$$

Дар ин ҷо (k) – коэффисенти суръати ифлосшавӣ (вобаста ба шароити иқлимӣ), (t) – вақти истифодабарӣ бе тоза кардани сатҳи модул мебошад.

Дар моделҳои дақиқтар вобастагии экспоненсиалӣ истифода мешавад, ки сершавии қабати ифлосиҳоро ба назар мегирад:

$$L_s(t) = L_{\max} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

Ин ҷо L_{max} – сатҳи ниҳоии ифлосшавӣ мебошад.

Боришоти атмосферӣ ба ҳолати сатҳи модулҳо таъсир расонида, тоза шудани қисман ё пурраи онҳоро таъмин мекунад. Ин равандро тавассути зариби (коэффисенти) барқароршавӣ ба назар гирифтан мумкин аст:

$$L_s(t^+) = L_s(t^-) \cdot (1 - \eta_{rain}) \quad (4)$$

Дар ин ҷо, $L_s(t^-)$ – сатҳи ифлосшавӣ то боридани боришот, $L_s(t^+)$ – сатҳи ифлосшавӣ пас аз тоза шудан, η_{rain} – зариби тозакунӣ (0-1), ки аз шиддатнокии боришот вобаста мебошад.

«Бо дарназардошти омилҳои зикршуда, модели математикии ниҳоии иқтидори истеҳсолии неругоҳи фотоэлектрикӣ дар шакли зерин ифода карда мешавад»:

$$P(t) = P_{nom} \cdot \frac{G(t)}{G_{STC}} \cdot [1 + \gamma(T_c(t) - T_{ref})] \cdot (1 - L_s(t)) \quad (5)$$

«Дар ин ҷо, P_{nom} – иқтидори номиналии неругоҳи фотоэлектрикӣ, $G_{(t)}$ – радиатсияи ҷории офтобӣ, G_{STC} – радиатсияи офтобӣ дар шароити стандартии санҷишӣ, γ – зариби ҳароратии иқтидор», «$T_c(t)$ – ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ, T_{reff} – ҳарорати стандартӣ (одатан 25 ^oC), $L_s(t)$ – сатҳи ифлосшавии ҷорӣ»

Модели математикӣ ва асосноккунии самти минбаъдаи таҳқиқот. Барои ба таври миқдорӣ ба ҳисоб гирифтани таъсири ҳарорат дар моделҳои фотоэлектрикӣ зариби ҳароратии иқтидор истифода карда мешавад. Ҳамчунин модели эмпирикии муайян кардани ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ дар асоси ҳарорати номиналии кори элемент NOCT баррасӣ ва таҳлил гардидаанд.

Барои шароити иқлими гарм муайян карда шудааст, ки ҳарорати МФЭ метавонад ба 45-55 ^oC ва бештар расида, талафоти иқтидор нисбат ба шароити стандартӣ то15-25 % афзоиш ёбад. Бинобар ин, ба ҳисоб гирифтани таъсири ҳарорат ҳангоми моделсозӣ барои баланд бардоштани дақиқии пешгӯии истеҳсоли неруи барқ, интихоби таҷҳизот, таҳияи чораҳои хунуккунӣ ва оптимизатсияи кори низоми фотоэлектрикӣ аҳамияти муҳим дорад.

<u>Дар боби дуюм</u> «***Таҳқиқоти назариявӣ ва таҷрибавии таъсири ҳарорат ба самаранокии энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ***» «таъсири реҷаи ҳароратӣ ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ таҳқиқ гардида, натиҷаҳои таҳлили назариявӣ бо маълумоти таҳқиқоти таҷрибавӣ дар шароити воқеии истифодабарӣ муқоиса карда шудаанд». Дар қисми назариявӣ нишон дода шудааст, ки баланд шудани ҳарорати кори МФЭ пеш аз ҳама ба коҳиши шиддати кори бебор ва шиддат дар нуқтаи иқтидори максималӣ оварда, тағйирёбии ҷараён нисбатан ночиз мемонад. Дар натиҷа иқтидори истеҳсолӣ ва зариби кори фоиданоки модул коҳиш меёбанд.

«Барои модули дар таҳқиқот истифодашавандаи SOLARMODUL Aleo S19 HE 300 W Supercharged дар шароити стандартии санҷиш STC иқтидори максималӣ 300 Вт, зариби кори фоиданок 16,7 %, шиддат дар нуқтаи иқтидори максималӣ 31,2 В, ҷараён 9,63 А, шиддати кори бебор 39,4 В ва ҷараёни расиши кӯтоҳ 9,97 А мебошад. Зариби ҳароратии шиддат -0,29 %/К ва зариби ҳароратии иқтидори максималӣ -0,40 %/К-ро ташкил медиҳад».

Ҳисобҳои муқоисавӣ (ҷадвали 4) нишон доданд, ки ҳангоми баланд шудани ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ аз 25 то 55 ^oC, иқтидори максималии модул аз 300 то 264 Вт коҳиш меёбад, яъне талафоти ҳисобии иқтидор тақрибан 12 %-ро ташкил медиҳад. Ҳамзамон, шиддат дар нуқтаи иқтидори максималӣ аз 31,2 то 28,5 В ва шиддати кори бебор аз 39,4 то 36,0 В коҳиш ёфта, ҷараён танҳо ба андозаи кам зиёд мешавад.

Натиҷаҳои асосии таҳқиқоти таҷрибавӣ (саҳроӣ). Таҳқиқот дар неругоҳи барқи офтобии автономии иқтидораш 10 кВт, воқеъ дар ноҳияи Кӯшониёни вилояти Хатлон, дар заминаи Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон гузаронида шудааст. Маҳали таҳқиқот дар баландии 419 м аз сатҳи баҳр, бо координатаҳои 37,872^o арзи шимолӣ ва 68,724^o тӯли шарқӣ ҷойгир мебошад. Барои гузаронидани таҳқиқоти таҷрибавӣ ду модули монокристаллии навъи SOLARMODUL Aleo S19 HE 300 W истифода гардиданд, ки бо кунҷи майлкунии 45^o насб шудаанд.

Дар шароити воқеии истифодабарӣ дар МФЭ мавриди таҳқиқ ченкунии параметрҳои электрикӣ ва ҳароратӣ гузаронида шуд. Ин имкон дод, ки таъсири ҳарорат ба тавсифоти электрикии модулҳо ва самаранокии воқеии энергетикии онҳо дар реҷаҳои гуногуни корӣ арзёбӣ карда шавад. Натиҷаҳои таҳлили муқоисавии ҳисобии тавсифоти модули мавриди таҳқиқ дар ҷадвали 4 оварда шудаанд.

Ҷадвали 4. Таҳлили муқоисавии хусусиятҳои модули Aleo S19 HE 300W дар шароити стандартии санҷиш (STC) ва шароити воқеии истифодабарӣ

Параметрҳои модул	**Ишоратҳои хуруфӣ**	**шароити стандартии санҷиш (STC) (25 °C)**	**Шароитҳои ҳисобӣ барои н. Кӯшониён (ҳарорати элементҳо 35 °C)**	**Шароитҳои ҳисобӣ барои н. Кӯшониён (ҳарорати элементҳо 55 °C)**	**Майлкунии параметрҳо ҳангоми 55 °C, %**
Иқтидори максималӣ	P_{max}	300 Вт	288,0 Вт	264,0 Вт	–12,0%
Шиддат дар нуқтаи иқтидори максималӣ	U_{mp}	31,2 В	30,3 В	28,5 В	–8,7%
Ҷараён дар нуқтаи иқтидори максималӣ	I_{mp}	9,97 А	9,68 А	9,77 А	+1,5%
Шиддати кори бебор	U_{oc}	39,4 В	38,3 В	36,0 В	–8,6%
ЗКФ-и модул	η	16,7 %	16,0 %	14,7 %	–12,0%

Хусусиятҳои муҳими таҷриба аз он иборат буд, ки як модул мунтазам аз чанг ва ифлосшавӣ тоза карда шуда, модули дуюм ба ҷамъшавии табиии чанг дучор карда шуд. Ин имконият дод, ки на танҳо таъсири мустақими ҳарорат, балки таъсири якҷояи ҳарорати баланд ва чанголудшавии сатҳи модул ба нишондиҳандаҳои энергетикии он арзёбӣ карда шавад.

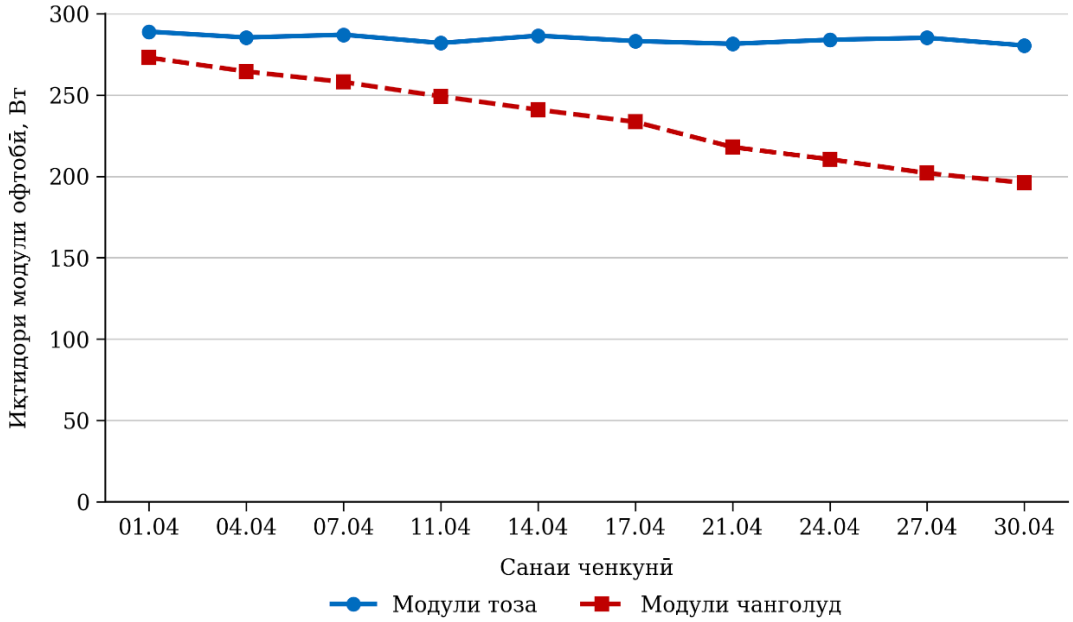


Расми 3. – «Намуди зоҳирии дастгоҳи таҷрибавӣ барои муайян намудани истеҳсоли неруи барқ аз модулҳои фотоэлектрикӣ дар шароити ноҳияи Кӯшониён, ҶТ: *(1 – модули фотоэлектрикии тозашуда; 2 – модули фотоэлектрикии табиатан чанголудшуда; 3 – люксметри рақамии навъи MS6610; 4 – мултиметри рақамии навъи CHYVictorVC890D; 5 – термометр/гидрометри навъи TH90; 6 – термометри инфрасурхи навъи IR01D; 7 – лампаҳои галогенӣ»*

Таҳқиқоти саҳроӣ моҳи апрели соли 2023 дар давоми якчанд рӯз пай дар пай гузаронида шуда, ченкуниҳо ҳар рӯз аз соати 11:00 то 16:00, яъне дар давраи баланд будани шиддатнокии радиатсияи офтобӣ ва гармшавии модулҳо, анҷом дода шудаанд. Дар рафти таҷриба ҳарорати ҳаво, ҳарорати сатҳи пеш ва пушти модул, шиддатнокии радиатсияи офтобӣ, намнокии нисбӣ, суръати бод, шиддат, ҷараён ва иқтидори истеҳсолии модулҳо ба қайд гирифта шуданд.

Натиҷаҳои ченкуниҳои саҳроӣ нишон доданд, ки ҳарорати сатҳи модулҳо аз ҳарорати ҳаво ба таври назаррас баландтар мебошанд. Ҳангоми ҳарорати ҳавои 35-37 ºС ҳарорати сатҳи болои модул ба 55-60 ºС расида, ҳарорати сатҳи пушти он дар баъзе соатҳо аз 65 ºС зиёд гардид. Баландтарин гармшавии модулҳо дар фосилаи соатҳои 12:00-14:00, ки ба давраи баландтарин шиддатнокии радиатсияи офтобӣ мувофиқат мекунад, мушоҳида карда шуд. Дар натиҷаи коркарди маълумоти таҷрибавӣ муқаррар гардид, ки баланд шудани ҳарорати кори модул бо коҳиши шиддати истеҳсолӣ ҳамроҳ гашта, тағйирёбии ҷараён нисбатан кам боқӣ мемонад.

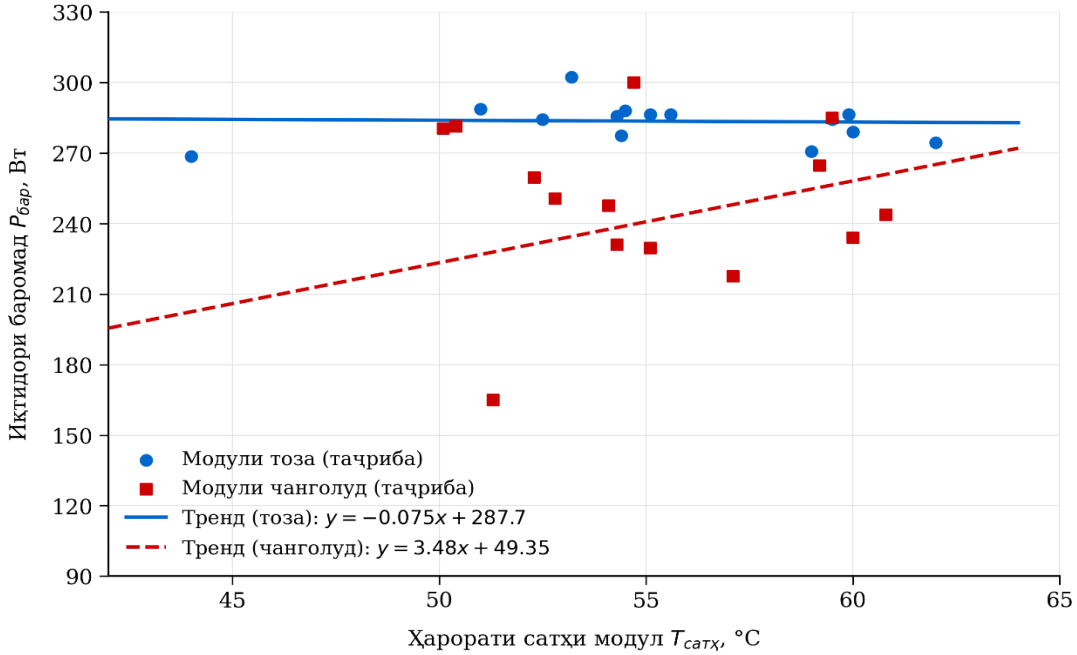
Натиҷаҳои махсусан муҳими муқоисаи модули тоза ва модули чанголуд ба даст оварда шуданд (расми 4). Муайян гардид, ки модули чанголуд дар тамоми диапазони таҳқиқшуда иқтидори истеҳсолии камтар дошта, талафоти бештар дар соатҳои гармшавии максималии сатҳ ба қайд гирифта шудааст. Иқтидори миёнаи модули тоза дар баъзе давраҳо 280,0-289 Вт, дар ҳоле ки иқтидори модули чанголуд то 196-273 Вт паст гардид. Дар шароити абрнокӣ ва намнокии баланди ҳаво коҳиши иқтидор боз ҳам бештар зоҳир шудааст.



Расми 4. – Динамикаи муқоисавии тағйирёбии иқтидори истеҳсолшавандаи МФЭ-и тозашуда ва чанголуд дар давраи мушоҳидаҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ

Яке аз натиҷаҳои муҳимтарини таҳқиқоти таҷрибавӣ ин муайян кардани талафоти иқтидор ҳангоми ҳарорати баланди сатҳи модул ба ҳисоб меравад. Муайян карда шуд, ки ҳангоми расидани ҳарорати сатҳи модул ба тақрибан 60 ºС, иқтидори истеҳсолии он нисбат ба шароити стандартии санҷиш STC метавонад 15-20 % коҳиш ёбад. Ҳамин тариқ, натиҷаи таҷрибавӣ нисбат ба ҳисобҳои назариявӣ таъсири воқеии ҳароратро дар шароити истифодабарии минтақаи гарм равшантар нишон медиҳад.

Дар асоси маълумотҳои таҷрибавӣ вобастагии иқтидори истеҳсолии модул аз ҳарорати сатҳи он муайян карда шуд. Таҳлили графикӣ (расми 5) нишон дод, ки бо баланд шудани ҳарорати сатҳи модул иқтидори истеҳсолӣ мунтазам коҳиш меёбад. Барои модули тоза тамоюли возеҳи манфии ҳароратӣ ба қайд гирифта шуда, ҳангоми ҳарорати муҳити атроф 32-37 ºС, ҳарорати сатҳи модули тоза ба 53-62 ºС расидааст. Ҳамзамон натиҷаҳои таҷрибавӣ нишон доданд, ки чанголудшавӣ таъсири ҳароратиро пурзӯр мекунад. Қабати чанг аз як тараф воридшавии радиатсияи офтобиро ба ЭФЭ маҳдуд намуда, аз тарафи дигар мубодилаи гармиро бо муҳити атроф бад мекунад. Дар натиҷа, модули чанголуд ҳарорати сатҳи баландтар дошта, коҳиши бештари иқтидори истеҳсолиро нишон медиҳад. Дар шароити беруна модули чанголуд ҳарорати сатҳи 50,1-60,8 ºС дошта, дар шароити абрнокии тағйирёбанда иқтидори истеҳсолии он то 111,7-121,15 Вткоҳиш ёфтааст.



Расми 5. – Вобастагиҳои таҷрибавӣ ва тамоюлҳои (тренд) хаттии тағйирёбии иқтидори МФЭ-и тозашуда ва чанголуд ҳангоми тағйирёбии ҳарорати сатҳи он

«Ҳамин тариқ, таҳқиқоти саҳроӣ нишон доданд, ки истифодаи нишондиҳандаҳои номиналии модул дар шароити стандартии STC барои арзёбии истеҳсоли воқеии неруи барқ дар минтақаҳои гарм метавонад ба натиҷаҳои аз воқеият фарқкунанда оварда расонад». Баланд шудани ҳарорати сатҳи модул, махсусан дар якҷоягӣ бо чанголудшавӣ, боиси коҳиши шиддат, иқтидор ва самаранокии энергетикии модул мегардад. Ин натиҷаҳо зарурати ба назар гирифтани ҳарорати воқеии кори модул ҳангоми моделсозӣ ва лоиҳакашии неругоҳҳои барқи офтобиро асоснок мекунанд.

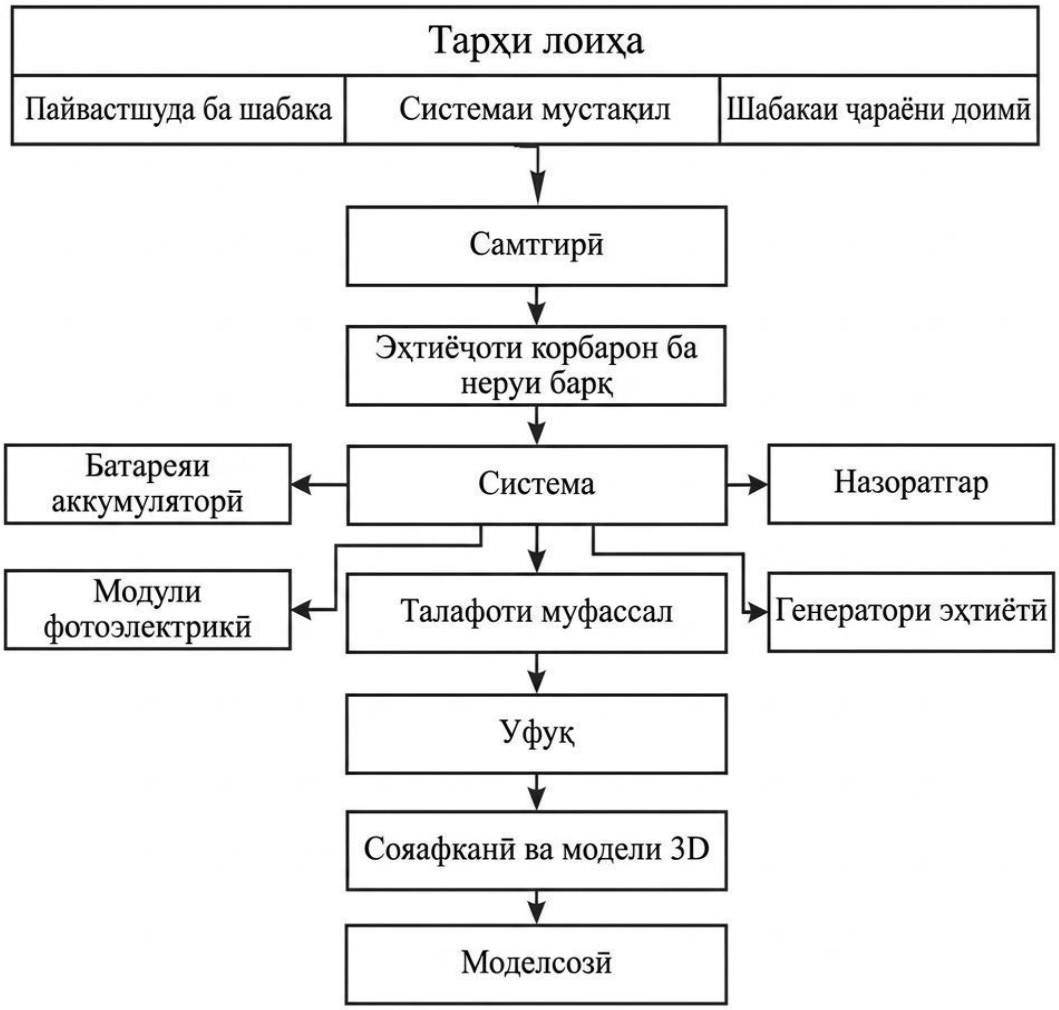
Дар асоси натиҷаҳои таҷрибавӣ истифодаи роҳҳои техникии паст намудани сарбории ҳароратӣ, аз ҷумла шамолдиҳии табиӣ, оптимизатсияи насбкунӣ, конструксияҳои гармихоричкунанда, рӯйпӯшҳои муҳофизатӣ ва тоза нигоҳ доштани сатҳи модулҳо пешниҳод шудааст. Дар таҳқиқот, аз ҷумла, истифодаи плёнкаи махсуси голографӣ барои паст намудани гармшавии сатҳи МФЭ пешниҳод гардидааст. «Инчунин бо мақсади санҷиш ва тасдиқи мутобиқати натиҷаҳои таҳқиқоти назариявӣ ва таҷрибавӣ, дар бобҳои минбаъдаи диссертатсия моделсозии компютерӣ бо истифода аз барномаҳои PVsyst ва MATLAB/Simulink гузаронида шудааст».

<u>Дар боби сеюм</u> «***Моделсозии реҷаҳои корӣ ва интихоби таҷҳизотҳои барқи неругоҳи фотоэлектрикӣ дар муҳити барномавии PVsyst бо дарназардошти омилҳои ҳароратӣ***» «дар маҷмуи барномавии PVsyst реҷаҳои кори неругоҳи барқи фотоэлектрикӣ моделсозӣ гардида, интихоби таҷҳизоти электрикии он бо дарназардошти таъсири ҳарорат асоснок карда шудааст». Мақсади асосии моделсозӣ муайян намудани иқтидори зарурии низоми автономии фотоэлектрикӣ, арзёбии таъсири шароити иқлимӣ ва ҳарорат ба истеҳсоли неруи барқ, таҳлили талафоти энергетикӣ ва муайян намудани нишондиҳандаҳои самаранокии низоми автономӣ мебошад.

Моделсозӣ барои шароити маҳалии воқеъ дар ноҳияи Кӯшониён гузаронида шудааст. Координатаҳои ҷуғрофии маҳал 37,872° арзи шимолӣ ва 68,724° тӯли шарқиро ташкил дода, баландии ҷойгиршавӣ аз сатҳи баҳр 419 м мебошад. Барои моделсозӣ самти майлкунии модулҳо нисбат ба самти ҷануб бо азимут 0° ва кунҷи майлкунӣ 45° интихоб карда шудааст. Ҳисобҳо нишон доданд, ки радиатсияи солонаи офтобӣ дар сатҳи майлкардашуда 1946 кВт·соат/м^2-ро ташкил медиҳад, ки нисбат ба сатҳи уфуқӣ 11,86 % зиёд мебошад. Ин натиҷа самаранокии интихоби кунҷи майлкунии модулҳоро барои шароити мавриди таҳқиқ тасдиқ

менамояд. Барои иҷрои пайдарпайии марҳалаҳои моделсозии тақлидии низоми автономии фотоэлектрикӣ, нақшаи блоки алгоритмӣ таҳияшуда дар расми 6 оварда шудааст. Таҳлили сохтори таҳияшудаи ҳисобкуниҳо (расми 6) нишон медиҳад, ки раванди моделсозӣ хусусияти пайдарпай дорад.

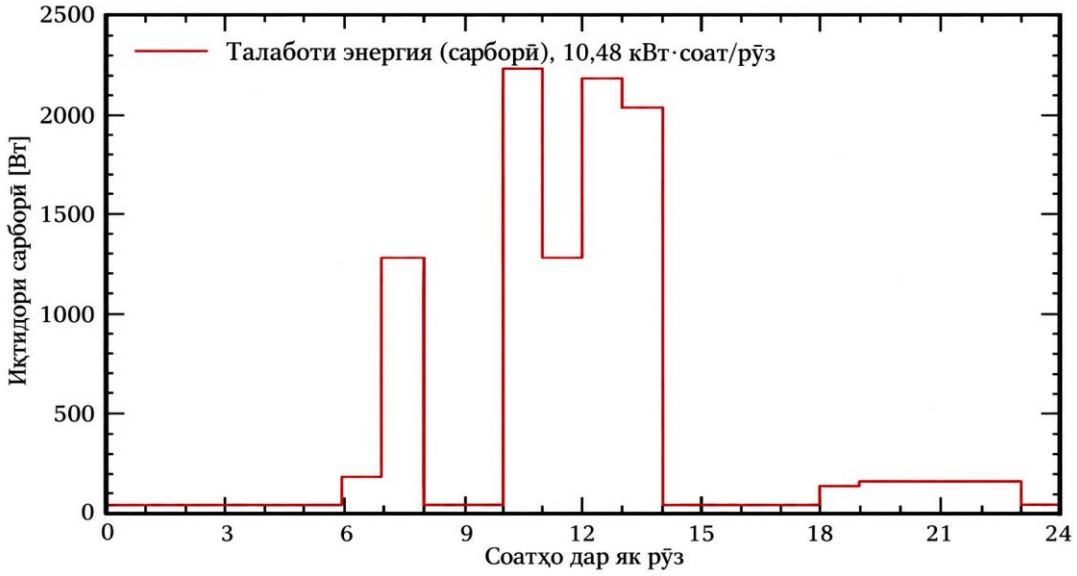
«Дар марҳалаи ибтидоӣ ба модел координатаҳои ҷуғрофии объект ва ҳаҷми сарбории электрикии муайяншуда ворид карда шуда, сипас самтгирии фазоӣ ва конфигуратсияи дастгоҳи фотоэлектрикӣ, инчунин параметрҳои асосии таҷҳизоти қуввагии низоми фотоэлектрикӣ муқаррар карда мешаванд».



Расми 6. – Сохтори иҷрои моделсозӣ дар барномаи PVsyst

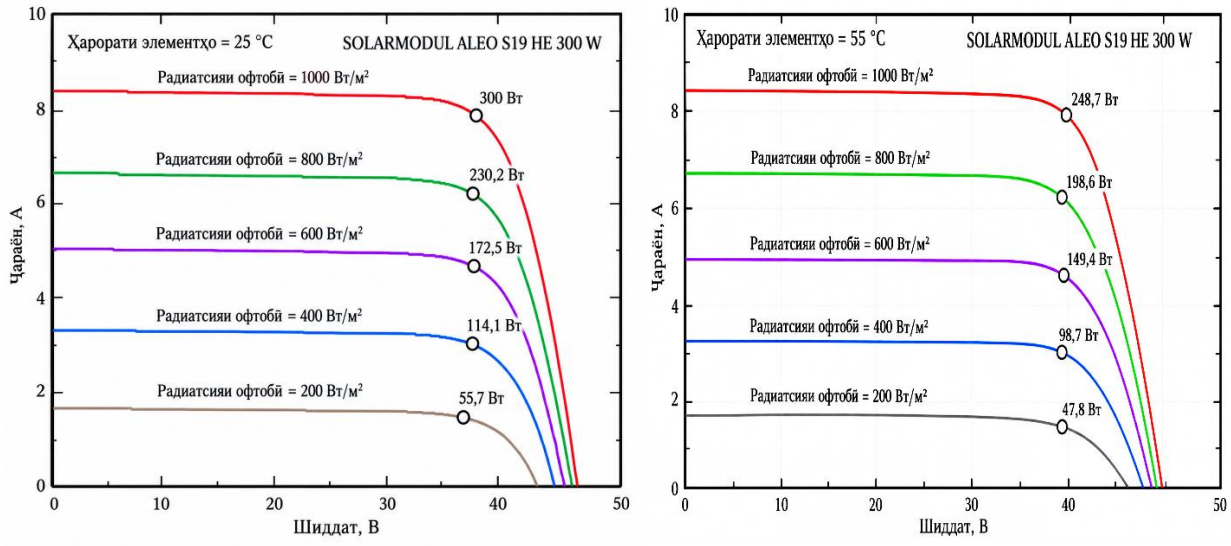
Барои муайян намудани иқтидори низоми автономии фотоэлектрикӣ сарбории баркӣ таҳлил карда шуда, шумора, иқтидор ва вақти соатҳои истифодабарии қабулкунакҳои баркӣ дар барнома муайян карда шудааст. Иқтидори насбшудаи сарбории электрикӣ 7 кВт ва истеъмоли миёнаи шабонарӯзии неруи барқ 10,483 кВт·соат/шабонарӯз муайян карда шуд. Дар асоси натиҷаҳои ҳисоб иқтидори насбшудаи низоми фотоэлектрикӣ 13,50 кВтр интихоб карда шуд.

Низом аз модулҳои фотоэлектрикии SOLARMODUL ALEO S19 бо иқтидори номиналии 300 Вт иборат буда, шумораи умумии модулҳо 45 ададро ташкил медиҳад. Барои захиракунии неруи барқ 19 адад батареяи аккумулятории литий-ионӣ бо иқтидори 65,6 А·соат барои як аккумулятор ва иқтидори умумӣ 1246,4 А·соат барои 19 адад ва шиддати номиналии 48 В интихоб карда шудааст. Ҳамчунин, барои таъмини боэътимоди барктаъминкунӣ генератори эҳтиётии дорои иқтидори 3 кВт дар низом ба назар гирифта шудааст. Ҷадвали шабонарӯзии сарбории электрикии истеъмолкунандагон дар расми 7 оварда шудааст.



Расми 7. – Графики сарбории электрикии шабонарӯзии истеъмолкунандагони низоми автономии фотоэлектрикӣ

Яке аз натиҷаҳои муҳими моделсозӣ муайян намудани таъсири ҳарорати муҳити зист ба параметрҳои электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ мебошад. Дар барномаи компютерии PVsyst тавсифоти волтамперии модулҳо дар ҳарорати 25 ва 55 ºС сохта таҳлил карда шудааст. Натиҷаҳои моделсозӣ дар графикҳои расми 8 овардашуда нишон медиҳанд, ки бо баланд шудани ҳарорати модул аз 25 то 55 ºС иқтидори максималии он аз 300 Вт то 248,7 Вт коҳиш ёфтааст. Ҳамин тариқ, талафоти иқтидори истеҳсолӣ 51,3 Вт, ё тақрибан 17,1 %-ро ташкил медиҳад. Инчунин бо баланд шудани ҳарорати модул, шиддати кори бебор U_{oc} коҳиш ёфта, тағйирёбии ҷараёни расиши кӯтоҳ I_{sc} нисбатан кам ба назар мерасад.

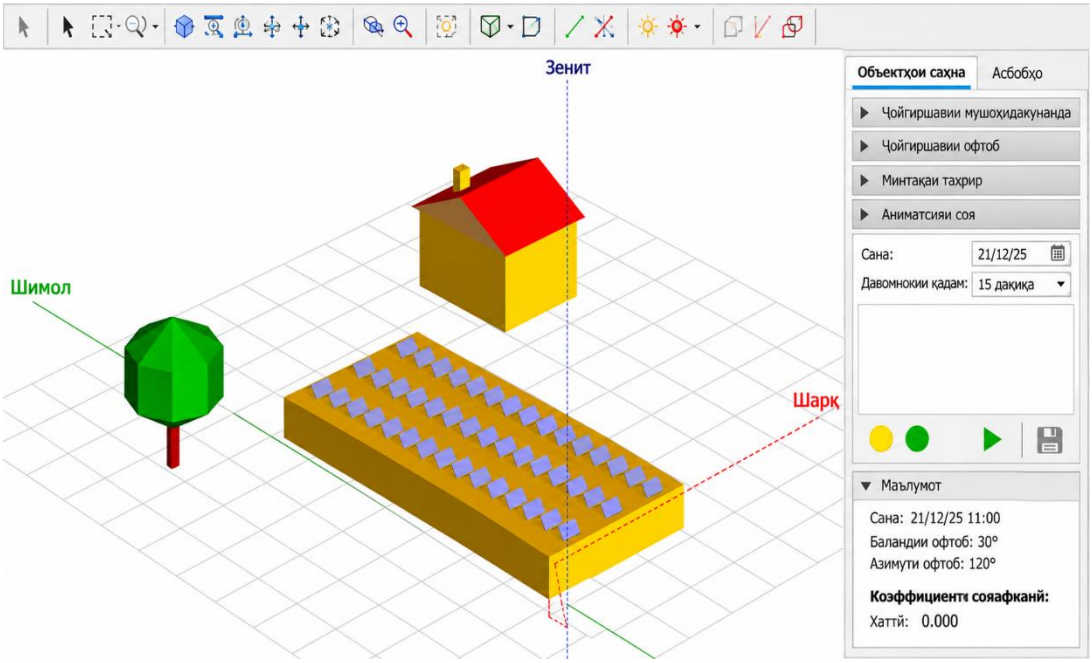


а) б)

Расми 8. – Таҳлили муқоисавии тавсифоти ҳисобии волтамперӣ (ТВА)-и МФЭ дар ҳарорати кории 25 ºС (а) ва 55 ºС (б)

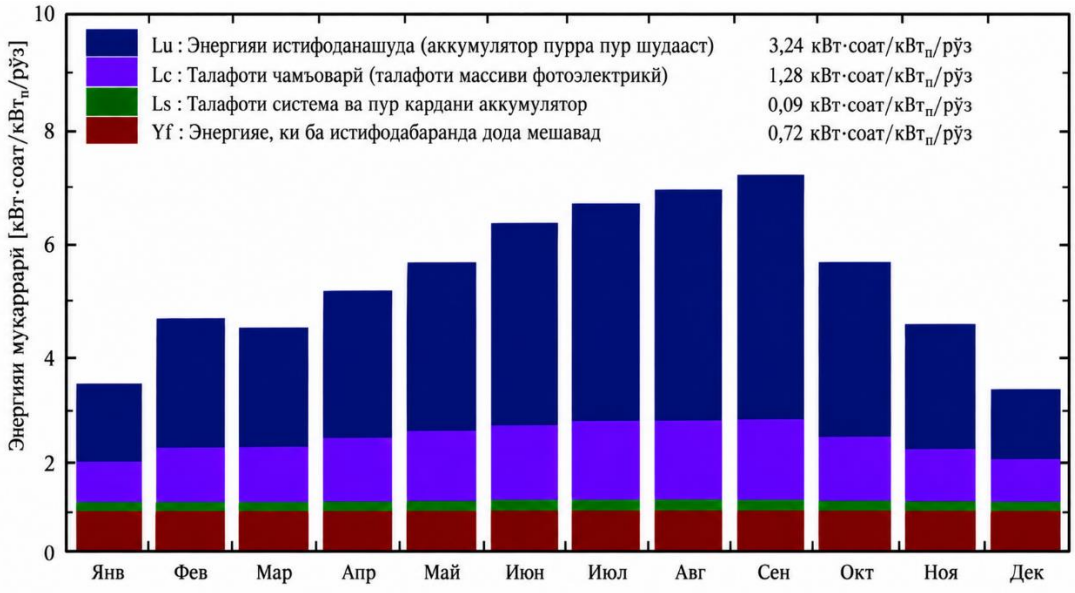
Барои ба ҳисоб гирифтани таъсири объектҳои атроф ба пешгирӣ намудани радиатсияи офтобӣ дар муҳити PVsyst модели сеченакаи мавқеи ҷойгиршавии модулҳо таҳия карда шуд (расми 9). Дар модели мазкур ҳаракати Офтоб ва минтақаҳои эътимолии соягузорӣ аз ҷониби объектҳои доимӣ ба назар гирифта шуда, таъсири онҳо ба радиатсияи қабулшаванда арзёбӣ гардид. Моделсозии сеченака имконият медиҳад, ки таъсири соягузории геометрӣ пеш аз интихоби ниҳоии ҷойгиршавии модулҳо муайян карда шавад.

Натиҷаҳои ҳисобкуниҳои энергетикӣ дар барномаи PVsyst нишон доданд, ки радиатсияи самараноки офтобӣ дар сатҳи массиви фотоэлектрикӣ 1756 кВт·соат/м^2-ро ташкил медиҳад. «Энергияи номиналии истеҳсошавандаи солонаи низоми фотоэлектрикӣ дар шароити стандартии STC 24180 кВт·соат ҳисоб карда шуд. Самаранокии умумии низоми фотоэлектрикӣ 14,78 %-ро ташкил дод». «Таҳлили тавозуни энергетикӣ нишон дод, ки талафот вобаста ба баландшавии ҳарорат 4,0 %, талафоти вобаста ба таназзули модулҳо 0,75 %, талафот дар пайвастагиҳо 2,6 % ва талафоти омикӣ дар занҷирҳои ҷараёни доимӣ 5,13 %-ро ташкил медиҳанд». Баъд аз ба ҳисоб гирифтани талафоти асосӣ, энергияи самараноки дар низом истеҳсолшуда 4071 кВт·соат/сол муайян карда шуд.



«Расми 9. – Модели сеченакаи низоми фотоэлектрикӣ ва таъсири соягузории объектҳои атроф»

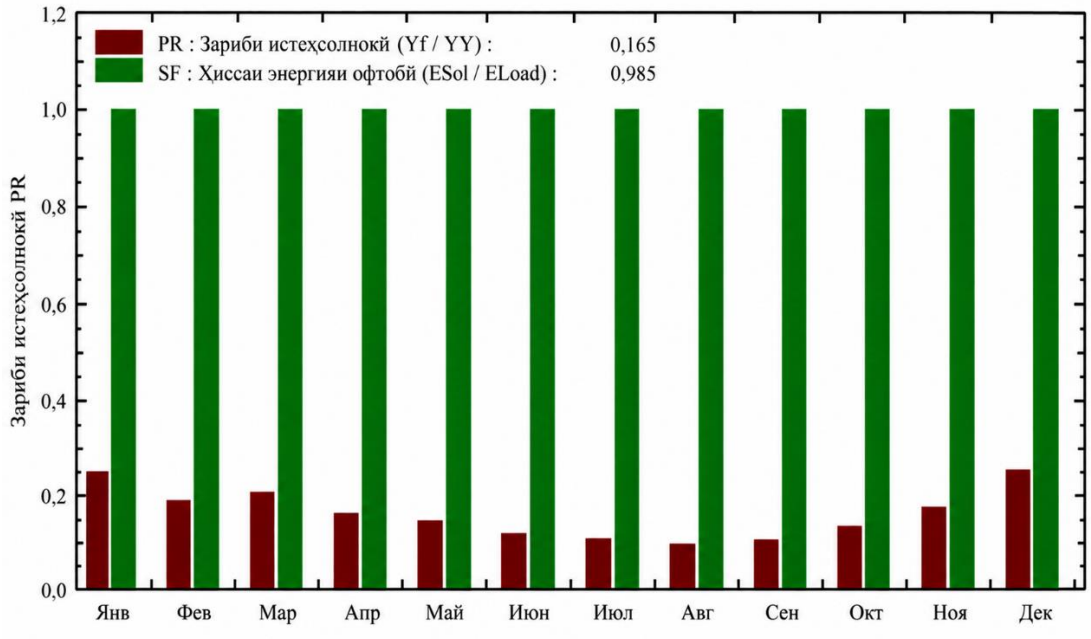
«Дар натиҷаи моделсозии минбаъдаи низоми автономӣ (расми 10) бо дарназардошти кори инвертор», аккумулятор ва дигар элементҳои низом, миқдори неруи барқе, ки барои интиқол ба истеъмолкунанда дастрас мегардад, 3612 кВт·соат/солро ташкил дод.



Расми 10. – Тавозуни энергетикӣ ва сохтори талафоти низоми фотоэлектрикӣ

Нишондиҳандаҳои энергияи ба истеъмолкунанда додашудаи ба меъёри даровардашуда (Yf) ба ҳисоби миёна 0,72 кВт·соат/(кВтр·шабонарӯз) баробар мебошад. Энергияи истифоданашуда ҳангоми пур будани аккумулятор (Lu) 3,24 кВт·соат/(кВтр·шабонарӯз) ва талафоти ҷамъоварӣ дар массиви фотоэлектрикӣ (Lc) 1,28 кВт·соат/(кВтр·шабонарӯз) ва талафоти низомӣ ва талафот ҳангоми пуркунии заряди аккумуляторҳо (Ls) 0,09 кВт·соат/(кВтр·шабонарӯз)-ро ташкил медиҳанд.

Арзёбии нишондиҳандаҳои интегралии кори низоми фотоэлектрикӣ (расми 11) нишон дод, ки зариби истеҳсолнокии он (PR) 0,165 ё 16,5 % ва ҳиссаи энергияи офтобӣ дар пӯшонидани сарбории электрикӣ (SF) 0,985 ё 98,5 %-ро ташкил медиҳад. Қимати SF нишон медиҳад, ки 98,5 % талаботи солонаи неруи барқи истеъмолкунанда аз ҳисоби энергияи офтобӣ таъмин карда мешавад. Ҳамзамон, қимати PR таъсири маҷмуи омилҳои иқлимӣ, ҳароратӣ, техникӣ ва талафоти дохилии низоми фотоэлектрикиро инъикос менамоянд.



Расми 11. – Нишондиҳандаҳои интегралии PR ва SF-и низоми фотоэлектрикӣ

Ҳамин тариқ, «моделсозии низоми автономии фотоэлектрикӣ дар муҳити PVsyst имкон дод, ки параметрҳои асосии низом барои шароити ноҳияи Кӯшониён муайян ва асоснок карда шаванд». Натиҷаҳои бадастомада нишон доданд, ки барои арзёбии истеҳсоли воқеии неруи барқ истифодаи танҳо параметрҳои номиналии модулҳо дар шароити стандартии STC кифоя нест. Таъсири ҳарорат, радиатсияи офтобӣ, соягузорӣ ва талафоти энергетикии элементҳои низом бояд дар ҳисобҳои энергетикӣ ба назар гирифта шавад. Моделсозии анҷомдодашуда барои интихоби иқтидори асосноки НФЭ ва таҷҳизоти барқӣ, инчунин баҳодиҳии нишондиҳандаҳои энергетикии низоми автономии фотоэлектрикӣ заминаи ҳисобӣ фароҳам овард.

<u>Дар боби чорум</u> «*Таҳқиқи реҷаҳои кори дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ дар асоси моделсозии равандҳои ҳароратӣ*» таҳқиқ гардида, методикаи ҳисоб ва арзёбии нишондиҳандаҳои электрикии МФЭ бо дарназардошти истифодаи муҳофизати гармии модул-термомуҳофизат таҳия карда шудааст. барои ҳисобҳо модули фотоэлектрикии SOLARMODUL ALEO S19 бо иқтидори номиналии 300 Вт истифода гардида, таъсири ҳарорати муҳити атроф ба параметрҳои электрикии он дар реҷаҳои гуногуни ҳароратӣ таҳлил карда шудааст. Ҳамзамон дар боби чорум таъсири ҳарорати муҳити атроф ба нишондиҳандаҳои электрикии МФЭ ва самаранокии термомуҳофизати пешниҳодшуда бо истифода аз ҳисобҳои математикӣ арзёби гардида, дар асоси натиҷаҳои бадастомада тавсифоти волтамперӣ ва тавоноии модул сохта шудаанд.

Барои муайян кардани таъсири миқдории ҳарорат ба параметрҳои асосии МФЭ панҷ нишондиҳанда ҳисоб карда шудаан: ҷараёни расиши кӯтоҳ, ҳарорати кории ЭФЭ, шиддати кори бебор, иқтидори максималии истеҳсолӣ ва зариби пуршавии модул. Дар модели соддакардашуда таъсири ҳарорат ба ҷараёни расиши кӯтоҳ ба назар гирифта нашудааст, зеро зариби ҳароратии ҷараён нисбат ба зариби ҳароратии шиддат хеле хурд мебошад. Ҷараёни ҳисобии расиши кӯтоҳ вобаста ба зичии иқтидори радиатсияи офтобӣ аз руйи муодилаи зерин муайян карда шудааст:

$$I_{PK} = I_{SC} \cdot \frac{E}{E_{STC}}, \quad A \tag{6}$$

Дар ин ҷо $I_{рк}$ – ҷараёни РК-и МФЭ, А; I_{STC} – ҷараёни РК-и МФЭ "дар шароити стандартии санҷиш (STC), ки барои модули таҳқиқшаванда 9,97 А мебошад; E – зичии радиатсияи офтобӣ, Вт/м^2; E_{STC} – зичии иқтидори радиатсияи офтобӣ дар шароити STC, ки ба 1000 Вт/м^2 баробар аст».

«Ҳарорати кории ЭФЭ бо дарназардошти ҳарорати муҳити атроф ва зичии иқтидори радиатсияи офтобӣ аз рӯйи муодилаи зерин ҳисоб карда шудааст:

$$T_{ЭОФ.} = T_{мух.атр.} + E \cdot \left(\frac{T_{NOCT} - 20}{800} \right), \quad ^{o}C \tag{7}$$

Дар ин ҷо $T_{ЭОФ}$ – ҳарорати кории ҳисобии ЭФЭ, ºС; $T_{муҳ.атр.}$ – ҳарорати муҳити атроф, ºС; 20 ºС ва 800 Вт/м^2 параметрҳои шароити муайян намудани NOCT мебошанд».

Барои ба ҳисоб гирифтани таъсири термомуҳофизат ба тағйирёбии шиддати кори бебор $U_{КБ}$ муодилаи зерин истифода карда шуд.

$$U_{КБ} = U_{OC,STC} + K_U \cdot Z_{МГМ} (T_{эл.офт.} - 25), \quad B \tag{8}$$

«Дар ин ҷо $U_{КБ}$ – шиддати ҳисобии кори бебори МФЭ, В; $U_{OC,STC}$ – шиддати кори бебор дар шароити стандартии STC, В; K_U = –0,29 %/ºС ё –0,114 В/ºС – зариби ҳароратии шиддати модул; $Z_{МГМ}$ – зариби муҳофизати гармии модул, ºС; $T_{эл.офт.}$ – ҳарорати кории ҳисобии элементи фотоэлектрикӣ, ºС. Ҳангоми $Z_{МГМ}$ = 1 вобастагии стандартии ҳароратии шиддат қабул гардида, ҳангоми 0 < $Z_{МГМ}$ < 1 коҳиши таъсири ҳароратӣ дар натиҷаи истифодаи термомуҳофизат ба назар гирифта мешавад».

Иқтидори максималии истеҳсолии модул бо дарназардошти ҷараёни РК, шиддати кори бебор ва зариби пуршавӣ аз рӯйи муодилаи зерин муайян карда мешавад:

$$P_{макс} = I_{PK} \cdot U_{КБ} \cdot F_{ММ}, \quad Вт \tag{9}$$

Дар ин ҷо $F_{ММ}$ – зариби пуршавии МФЭ мебошад. Дар доираи модели қабулшуда $F_{ММ}$ доимӣ ҳисобида шуда, аз ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ ва зичии иқтидори радиатсияи офтобӣ вобаста карда нашудааст.

Барои муайян кардани зариби пуршавии модул дар шароити номиналӣ муодилаи (10) истифода гардид:

$$F_{ММ} = \frac{P_{макс}}{U_{КБ} \cdot I_{PK}} \tag{10}$$

Дар ин ҷо $P_{макс}$ – иқтидори максималии номиналии истеҳсолии МФЭ мебошад, ки аз ҷониби истеҳсолкунанда барои шароити стандартии санҷиш (STC), зичии иқтидори радиатсияи офтобӣ 1000 Вт/м^2, ҳарорати элементи фотоэлектрикӣ 25 ºС ва тақсимоти спектралии АМ 1,5 дода шудааст.

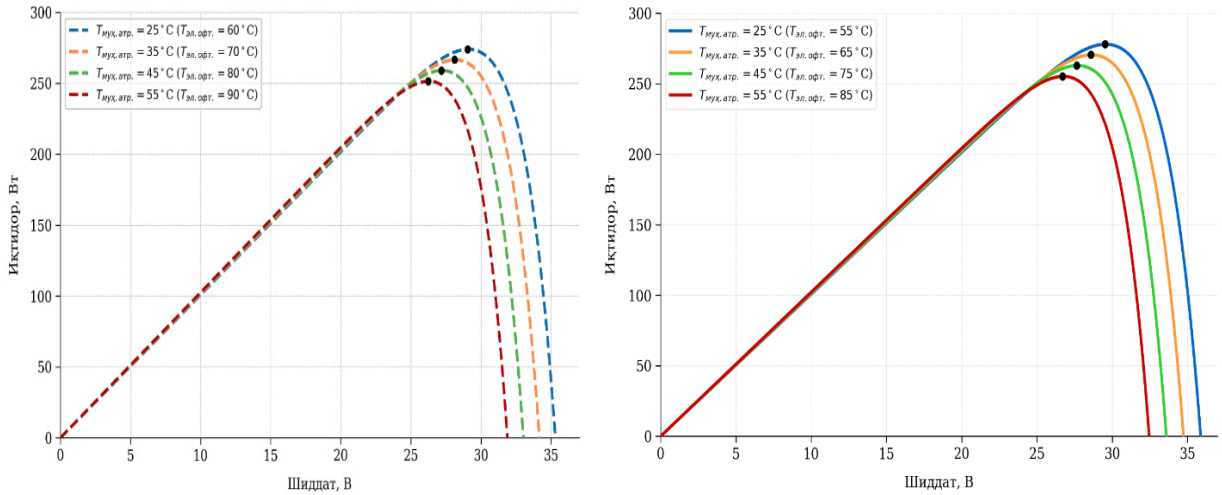
Натиҷаҳои ҳисобкунии нишондиҳандаҳои асосии электрикии МФЭ, ки бо истифода аз формулаҳои (6)-(10) барои ҳарорати гуногуни муҳити атроф ва бо дарназардошти таъсири термомуҳофизат ба даст оварда шудаанд, дар ҷадвали 5 оварда шудаанд.

Ҷадвали 5. Натиҷаҳои ҳисобии тавсифоти электрикии МФЭ SOLARMODUL ALEO S19 бо дарназардошти таъсири термомуҳофизат

Шартҳо	Ҳарорати муҳити атроф ($T_{муҳ.атр.}$, °C)	Ҳарорати кории эл. офтобӣ (ячейкаҳо), бе истифодаи ТМ ($T_{э.оф}$, °C)	Ҳарорати кории эл. офтобӣ (ячейкаҳо), бо истифодаи ТМ ($T_{э.оф}$, °C)	Ҷараёни расиши кӯтоҳ (I_{sc}, A)	Шиддати кори бебор бе истифодаи ТМ (U_{oc}, B)	Шиддати кори бебор бо истифодаи ТМ (U_{oc}, B)	Иқтидори максималии истеҳсолӣ бе истифодаи ТМ (P_{max}, Bm)	Иқтидори максималии истеҳсолӣ бо истифодаи ТМ (P_{max}, Bm)
Шароити (STC)	-	25	25	9,97	39,4	39,4	300	300
Реҷаҳои ҳисобӣ	25	60,0	55,0	9,92	35,31	35,88	274,0	278,01
	35	70,0	65,0	9,97	34,17	34,74	266,58	270,5
	45	80,0	75,0	10,02	33,03	33,60	259,0	262,91
	55	90,0	85,0	10,07	31,89	32,46	251,39	255,23

Маълумоти ҷадвали 5 нишон медиҳад, ки ҳангоми баланд шудани ҳарорати кории ЭФЭ шиддати кори бебор ва иқтидори максималии истеҳсолӣ коҳиш меёбанд. Масалан, ҳангоми ҳарорати муҳити атроф 45 ºС иқтидори ҳисобии модул бе термомуҳофизат 259,0 Вт, бо он бошад 262,91 Вт-ро ташкил медиҳад. Дар натиҷа, истифодаи термомуҳофизат ба паст шудани ҳарорати кории ЭФЭ ва қисман барқарор шудани шиддат ва иқтидори максималии истеҳсолии модул мусоидат мекунад.

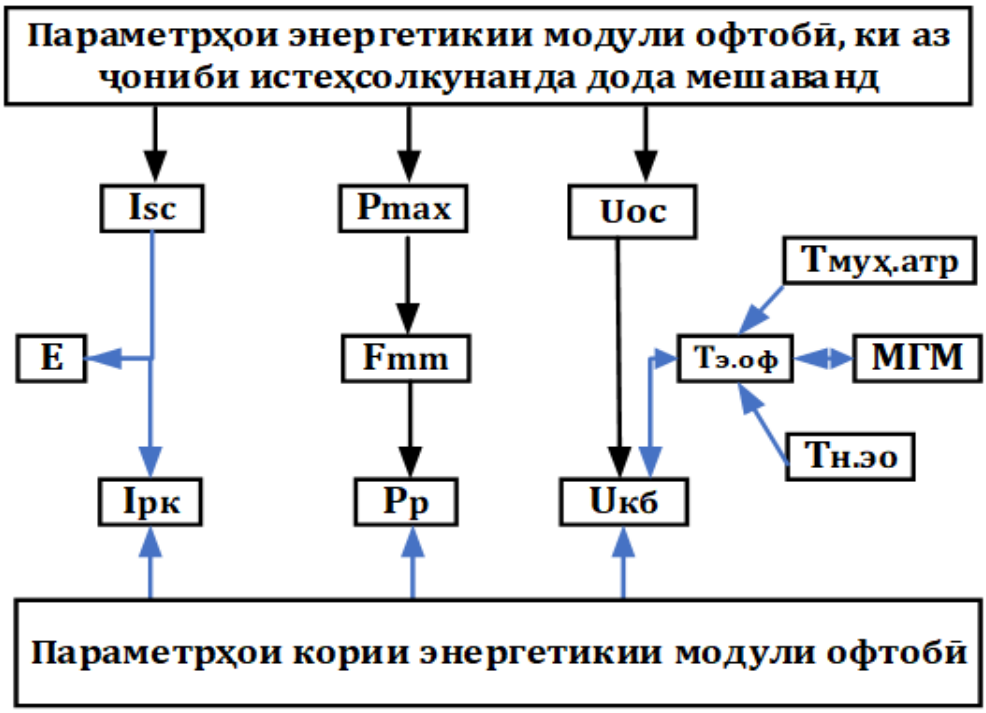
Натиҷаҳои ҳисобӣ ва муқоисаи тавсифоти тавоноии МФЭ дар расми 12 оварда шудаанд.



а) б)

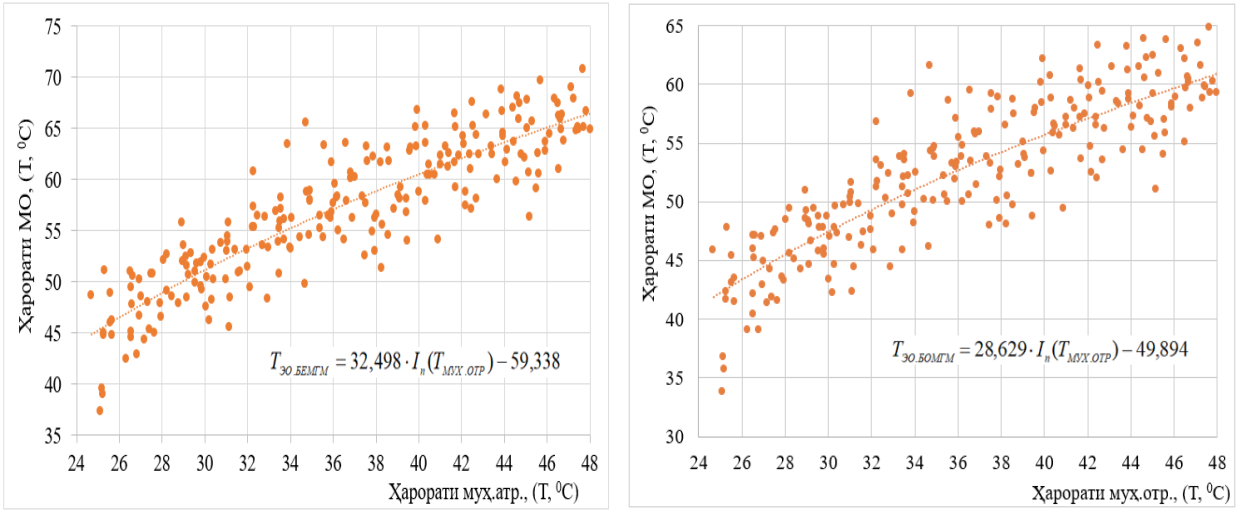
Расми 12. – «Тавсифоти тавоноии МФЭ SOLARMODUL ALEO S19: а) бе истифодаи термомуҳофизат ва б) бо истифодаи термомуҳофизат ҳангоми ҳароратҳои гуногуни муҳити атроф»

«Барои муайян кардани таъсири термомуҳофизати пешниҳодшуда ба тавсифоти электрикии МФЭ нақшаи сохтории муайян намудани параметрҳои асосии он таҳия карда шудааст» (расми 13). Дар ин нақша таъсири МГМ ба ҳарорати самаранокии кории элементи фотоэлектрикӣ ва истифодаи ҳарорати бадастомада барои муайян намудани ҷараёни РК, шиддати кори бебор ва иқтидори максималии ҳисобии модул нишон дода шудааст.



Расми 13. – «Нақшаи сохтории муайян намудани тавсифоти электрикии МФЭ дар шароити истифодабарӣ бо дарназардошти термомуҳофизат».

Барои санҷиши натиҷаҳои ҳисобӣ таҳқиқоти таҷрибавии ҳарорати сатҳи МФЭ дар қиматҳои гуногуни ҳарорати муҳити атроф ва радиатсияи офтобӣ гузаронида шуда, дар асоси маълумоти бадастомада бо истифода аз таҳлили регрессионӣ ва усули хурдтарин квадратҳо модели вобастагии фарқи ҳарорати МФЭ-и дорои термомуҳофизат ва бе он аз ҳарорати муҳити атроф таҳия карда шуд (расми 14).

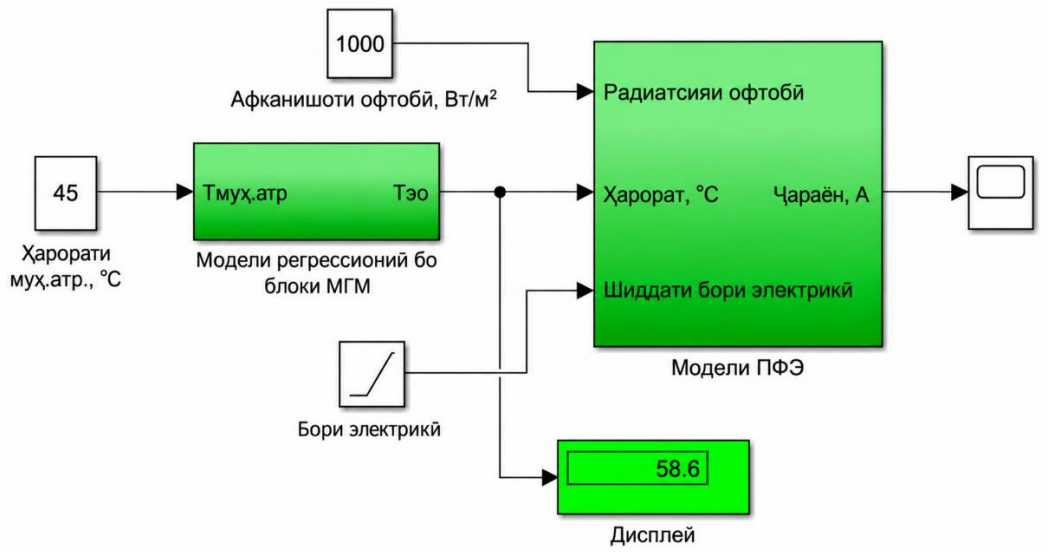


а) б)

Расми 14. – «Модели регрессионии вобастагии фарқи ҳарорати байни МФЭ-и дорои а) термомуҳофизат ва б) бе он аз ҳарорати муҳити атроф»

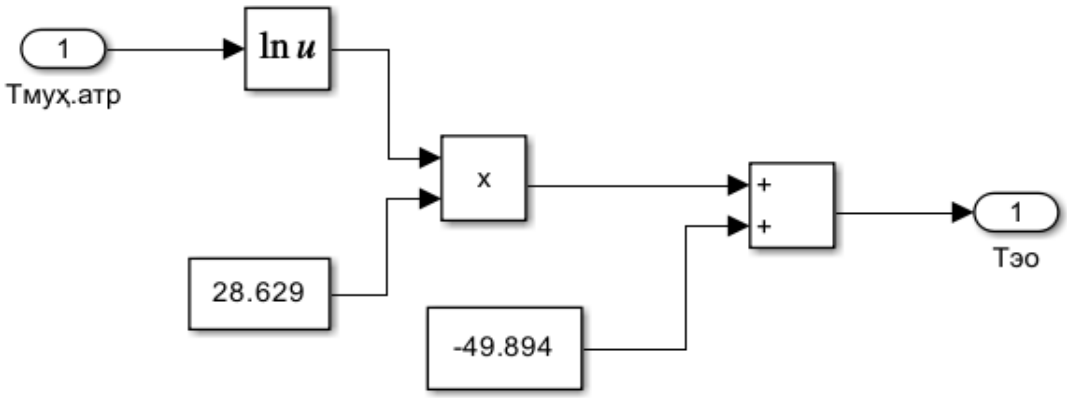
«Натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ нишон додан, ки ҳангоми ҳарорати муҳити атроф 45 °С будан, ҳарорати кории модул бе термомуҳофизат 62,13 °С, бо истифодаи термомуҳофизат 58,6 °С-ро ташкил медиҳад». Ҳамин тариқ, истифодаи термомуҳофизати пешниҳодшуда ҳарорати кории модулро ба 3,53 °С ё тақрибан 5,7 %, коҳиш медиҳад. Ин натиҷа самаранокии таъсири термомуҳофизатро дар паст намудани сарбории ҳароратии МФЭ тасдиқ менамояд.

Минбаъд дар ин боб барои тасдиқи мувофиқати натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии бадастомада ва самаранокии термомуҳофизат дар муҳити барномавии MATLAB/Simulink модели математикии дастгоҳи фотоэлектрикӣ таҳия карда шуд (расми 15). Дар модели пешниҳодшуда таъсири ҳарорати муҳити атроф ба ҳарорати кории МФЭ ва таъсири минбаъдаи он ба параметрҳои электрикии модул ба назар гирифта шудааст. Модел имконият медиҳад, ки ду реҷаи кори МФЭ бе термомуҳофизат ва бо он дар шароити якхелаи истифодабарӣ муқоиса карда шаванд.



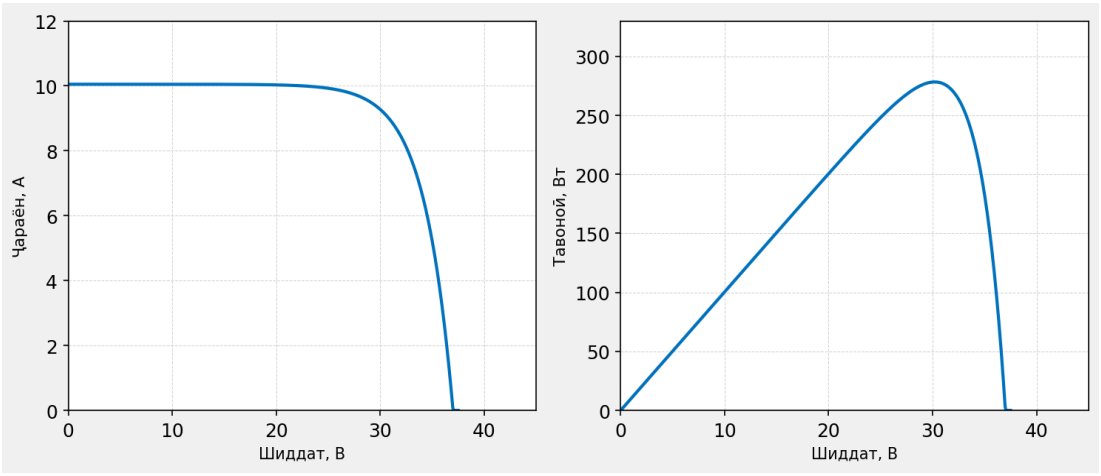
Расми 15. – «Модели дастгоҳи фотоэлектрикӣ дар муҳити MATLAB/Simulink бо истифодаи блоки муҳофизати гармии модул»

«Бо мақсади арзёбии таъсири термомуҳофизати пешниҳодшуда ба параметрҳои электрикии модули фотоэлектрикӣ, сохтори блоки муҳофизати гармии модул (МГМ) дар муҳити MATLAB/Simulink таҳия ва амалӣ карда шуда, он барои моделсозии тағйирёбии ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ ва ҳисобкунии параметрҳои асосии электрикии модул истифода гардид (расми 16)».

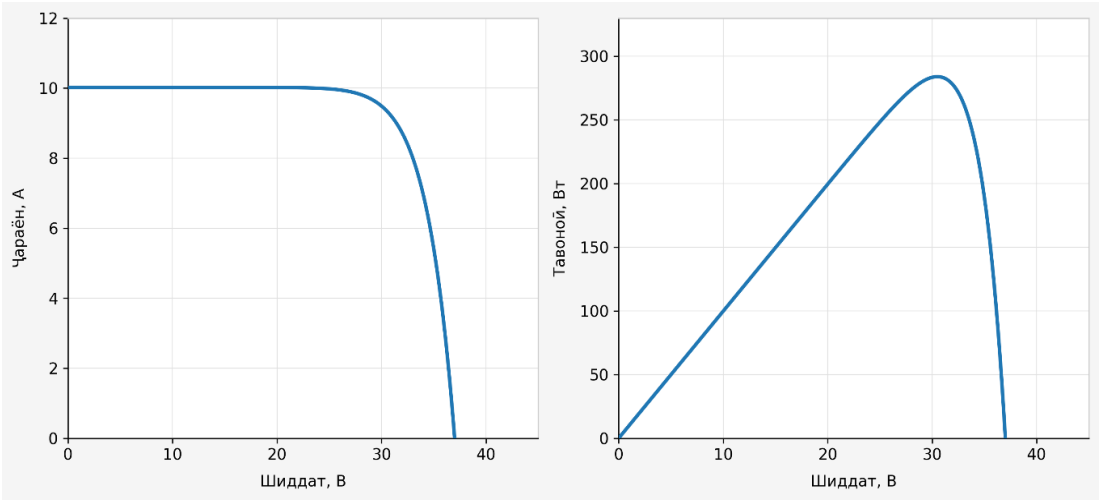


Расми 16. – Сохтори блоки муҳофизати гармии модул дар муҳити MATLAB/Simulink

Барои ҳарорати муҳити атроф 45 ºС натиҷаҳои моделсозӣ нишон доданд, ки паст шудани ҳарорати кории ЭФЭ боиси кам шудани талафоти иқтидор ва беҳтар шудани параметрҳои электрикии модул мегардад. Аз ҷумла, нигоҳ доштани ҳарорати ЭФЭ дар сатҳи нисбатан пасттар имкон медиҳад, ки шиддати кори бебор ва шиддат дар нуқтаи максималии иқтидор дар сатҳи баландтар нигоҳ дошта шуда, иқтидори максималии истеҳсолии модул нисбат ба ҳолате бе термомуҳофизат беҳтар гардад. Натиҷаҳои моделсозӣ дар шакли тавсифоти волтамперӣ ва тавоноии МФЭ дар расми 17 оварда шудааст.



а)



б)

Расми 17. – «Тавсифоти волтамперӣ (I-V) ва тавоноӣ (P-V)-и МФЭ ҳангоми ҳарорати муҳити атроф 45 ºС будан: а) бе термомуҳофизат; б) бо термомуҳофизат»

Ҳамин тавр, дар натиҷаи таҳқиқоти назариявӣ, таҷрибавӣ ва моделсозӣ методикаи баҳодиҳии таъсири ҳарорат ба параметрҳои электрикии модули фотоэлектрикӣ бо дарназардошти термомуҳофизат таҳия ва асоснок карда шуд. Муодилаҳои пешниҳодшуда имкон медиҳанд, ки ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ, ҷараёни расиши кӯтоҳ, шиддати кори бебор, зариби пуршавӣ ва иқтидори максималии истеҳсолии модул дар шароити гуногуни истифодабарӣ ҳисоб карда шаванд.

Натиҷаҳои ҳисобӣ ва таҷрибавӣ нишон доданд, ки истифодаи термомуҳофизат ба паст шудани ҳарорати кории МФЭ, кам шудани талафоти ҳароратии иқтидор ва нигоҳ доштани параметрҳои электрикии модул дар сатҳи нисбатан баландтар мусоидат менамояд. Модели таҳияшуда дар муҳити MATLAB/Simulink барои муқоисаи реҷаҳои кори МФЭ ва арзёбии миқдории таъсири ҳарорат ба нишондиҳандаҳои электрикӣ истифода гардида, барои таҳлили кори дастгоҳҳои фотоэлектрикӣ дар шароити ҳарорати баланди муҳити атроф, аз ҷумла шароити иқлими Ҷумҳурии Тоҷикистон, заминаи ҳисобӣ фароҳам меорад.

ХУЛОСАҲО ВА ТАВСИЯҲО

1. Омӯзиши таҳқиқоти мавҷуда ва таҳлили омилҳои таъсиррасон ба кори неругоҳҳои фотоэлектрикӣ нишон дод, ки ҳолати ҳароратии модулҳо дар ташаккули нишондиҳандаҳои энергетикии система нақши муҳим дорад. «Баландшавии ҳарорати корӣ боиси тағйирёбии параметрҳои асосии электрикӣ гардида, пеш аз ҳама коҳиши шиддати кори бебор ва

иқтидори максималии модулро ба вуҷуд меорад. Аз ин рӯ, ба инобат гирифтани таъсири ҳарорат ҳангоми арзёбӣ ва моделсозии истеҳсоли неруи барқ зарур мебошад» [4-М, 5-М, 6-М, 8-М, 14-М, 16-М].

2. «Қонуниятҳои таъсири ҳарорат ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҷиҳати назариявӣ ва таҷрибавӣ муайян карда шуданд». «Нишон дода шуд, ки бо баланд шудани ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ шиддати кори бебор ва иқтидори максималии истеҳсолӣ паст шуда, тағйирёбии ҷараёни расиши кӯтоҳ нисбатан кам мебошад. Зариби ҳароратии иқтидори модули дар таҳқиқот истифодашуда «тақрибан -0,40%/ºС» буда, таъсири назарраси ҳарорат ба истеҳсоли неруи барқро тасдиқ мекунад» [8-М, 8-М, 16-М].

3. «Модели тақлидии низоми автономии фотоэлектрикӣ дар муҳити барномаи PVsyst барои шароити ноҳияи Кӯшониёни Ҷумҳурии Тоҷикистон таҳия гардида, параметрҳои иқлимӣ, ҳароратӣ, сарбории электрикӣ ва техникии низоми автономӣ ба ҳисоб гирифта шуданд. Барои сатҳи моил бо кунҷи майлкунии 45º ва азимути 0º воридшавии солонаи радиатсияи офтобӣ 1946 кВт·соат/м^2 муайян гардид, ки нисбат ба сатҳи уфуқӣ 11,86 % зиёд мебошад» [1-М, 4-М, 6-М].

4. Конфигуратсияи техникии низоми автономии фотоэлектрикӣ асоснок карда шуд. Барои сарбории электрикии насбшудаи 7 кВт, сарбории максималии 6573 Вт ва истеъмоли шабонарӯзии 10,483 кВт·соат/шабонарӯз дастгоҳи фотоэлектрикии иқтидораш 13,68 кВтр, захиракунандаи аккумулятории литий-ионии дорои зарфияти 65,6 А·соат ва шиддати 48 В, инчунин генератори захиравии 3 кВт интихоб карда шуданд [1-М, 4-М, 6-М].

5. Таъсири ҳарорат ба тавозуни энергетикии низоми фотоэлектрикӣ миқдоран арзёбӣ карда шуд. Ҳангоми баланд шудани ҳарорати муҳити атроф аз 25 то 55 ºС, бо назардошти баланд шудани ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ, иқтидори максималии модули меъёриаш 300 Вт то 248,7 Вт, яъне тақрибан 17,1 % коҳиш ёфт. Дар тавозуни солонаи энергетикӣ энергияи ҳисобии низоми автономӣ 24180 кВт·соат/сол, зариби кори фоиданоки умумӣ 14,8 %, зариби истеҳсолнокии низом (PR) 16,5 % ва ҳиссаи энергияи офтобӣ дар пӯшонидани сарбории электрикӣ (SF) 98,5 % муайян карда шуд [4-М, 6-М, 8-М, 17-М].

6. Методикаи ҳисоб намудани параметрҳои электрикии модули фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири термомуҳофизат таҳия карда шуд. Методикаи муайян намудани ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ, ҷараёни расиши кӯтоҳ, шиддати кори бебор, зариби пуркунӣ ва иқтидори максималии истеҳсолиро дар бар мегирад. Ба модели ҳисобӣ блоки муҳофизати гармии модул (МГМ) ворид карда шуд, ки имкон медиҳад таъсири термомуҳофизат ба ҳарорати кории элементи фотоэлектрикӣ ба таври миқдорӣ ба ҳисоб гирифта шавад [8-М, 17-М].

7. Натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавӣ имкон доданд, ки хусусиятҳои тағйирёбии ҳарорати МФЭ вобаста ба ҳарорати муҳити атроф барои ду ҳолати истифода бо термомуҳофизат ва бе он ба таври миқдорӣ тавсиф карда шавад. Дар асоси маълумотҳои бадастомадаи таҳқиқоти таҷрибавии саҳроӣ, муодилаҳои регрессионӣ барои ду ҳолат муайян гардида, инчунин робитаи байни дараҷаи пастшавии ҳарорати модул ва ҳарорати муҳити атроф муқаррар карда шуд. Барои муайян намудани параметрҳои ин робита усули хурдтарин квадратҳо истифода гардид. Ин модели регрессионӣ ба модели тақлидӣ дар муҳити барномаи MATLAB/Simulink ҳамгиро карда шуд [8-М].

8. Модели математикии кори модули фотоэлектрикӣ дар муҳити барномаи MATLAB/Simulink таҳия ва барои муқоисаи ду реҷаи истифодабарӣ истифода карда шуд. Ҳангоми ҳарорати муҳити атрофи 45 ºС ҳарорати кории модули бе термомуҳофизат 62,13 ºС ва ҳангоми истифодаи термомуҳофизати пешниҳодшуда 58,6 ºС-ро ташкил дод. Ҳамин тавр, истифодаи термомуҳофизат ҳарорати кории модулро ба андозаи 3,53 ºС, ё тақрибан 5,7 % нисбат ба ҳолати бе термомуҳофизат паст намуд [5-М, 8-М].

Тавсияҳо оид ба татбиқи амалии натиҷаҳои таҳқиқот

– Ҳангоми лоиҳакашии неругоҳҳои барқи фотоэлектрикии автономӣ ва шабакавӣ, инчунин ҳангоми интихоби модулҳои фотоэлектрикӣ ва таҷҳизоти ҳисобии зарурӣ барои

объектҳое, ки дар шароити иқлими Ҷумҳурии Тоҷикистон ҷойгир мебошанд, таъсири ҳарорати кории модулҳо ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии онҳо ба назар гирифта шавад. Методикаи пешниҳодшуда метавонад ҳангоми муайян намудани иқтидори насбшудаи низоми фотоэлектрикӣ, арзёбии ҳаҷми солонаи истеҳсоли неруи барқ ва муайян кардани талафоти иқтидор вобаста ба ҳарорат истифода шавад.

– Модели таҳияшуда дар муҳити MATLAB/Simulink ва вобастагиҳои таҷрибавию регрессионии бадастомада барои истифода дар таҳқиқоти илмӣ, ҳисобҳои лоиҳавӣ ва раванди таълимӣ ҳангоми таҳлили таъсири ҳарорат ба параметрҳои электрикии модулҳои фотоэлектрикӣ тавсия карда мешаванд. Натиҷаҳои моделсозӣ метавонанд дар якҷоягӣ бо маҷмуи барномавии PVsyst ҳангоми арзёбии талафоти энергетикӣ, муқоисаи вариантҳои гуногуни конфигуратсияи низомҳои фотоэлектрикӣ ва баланд бардоштани дақиқии пешгӯии истеҳсоли неруи барқ дар шароити иқлими гарми Ҷумҳурии Тоҷикистон ва дигар минтақаҳои дорои шароити иқлими монанд истифода шаванд.

РӮЙХАТИ АДАБИЁТИ ИСТИФОДАШУДА

1. Безруких П.П. Состояние, перспективы и проблемы развития возобновляемых источников энергии / П.П. Безруких, Д.С. Стребков // Малая энергетика. – 2005. – № 1-2. – С. 6-12.

2. Стребков Д.С. Роль солнечной энергии в энергетике будущего / Д.С. Стребков // Теплоэнергетика. – 2006. – № 3. – С. 58-64.

3. Елистратов, В.В. Моделирование работы и оптимизация параметров систем автономного электроснабжения на основе ВИЭ / В.В. Елистратов, Е.С. Аронова // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – № 1. – С. 119-127.

4. Duffie John A., William A. Beckman, and Nathan Blair. Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind. John Wiley & Sons, 2020. DOI:10.1002/9781119540328

5. Ang T.-Z., Salem M., Kamarol M., Das H. S., Nazari M. A., Prabaharan N. et al. A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions // Energy Strategy Reviews. 2022.Vol. 43. Art. 100939. DOI: 10.1016/j.esr.2022.100939.

6. Holechek J.L., Geli H.M.E., Sawalhah M.N., Valdez R.A. A global assessment: Can renewable energy replace fossil fuels by 2050? // Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 8. Art. 4792. DOI: 10.3390/su14084792.

7. Faiman D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2008. Vol. 16, No. 4. P. 307–315.DOI: 10.1002/pip.813.

8. Skoplaki E., Palyvos J. A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations // Renewable Energy. 2009. Vol. 34, No. 1. P. 23–29. DOI: 10.1016/j.renene.2008.04.009.

9. Skoplaki E., Palyvos J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations // Solar Energy. 2009. Vol. 83, No. 5. P. 614–624. DOI: 10.1016/j.solener.2008.10.008.

10. Воротынцев Д.В., Тягунов М.Г. Прогноз выработки электроэнергии фотоэлектрическими электростанциями (на сутки вперед) с использованием машинного обучения // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 53–57. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-53-57.

11. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Методы машинного обучения для задач прогнозирования и максимизации выработки электроэнергии солнечной электростанции // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 223. № 2. С. 146–170. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2023/2/146-170.

12. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 6. С. 38–51.

13. Tsanakas I. A., Lokhat I., Jay A., Gregoire C., Rusnak J. State-of-Play and Emerging Challenges in Photovoltaic Energy Yield Simulations: A Multi-Case Multi-Model Benchmarking Study // Solar RRL. 2023. Vol. 7, No. 8. Art. 2200582. DOI: 10.1002/solr.202200582.

14. Adekanbi M. L., Alaba E. S., John T. J., Tundealao T. D., Banji T. I. Soiling Loss in Solar Systems: A Review of Its Effect on Solar Energy Efficiency and Mitigation Techniques // Cleaner Energy Systems. 2024. Vol. 7. Art. 100094. DOI: 10.1016/j.cles.2023.100094.

15. Norde Santos F., Wilbert S., Ruiz Donoso E., El Dik J., Campos Guzman L., Hanrieder N., Fernández García A., Alonso García C., Polo J., Forstinger A., Affolter R., Pitz-Paal R. Cleaning of Photovoltaic Modules through Rain: Experimental Study and Modeling Approaches // Solar RRL. 2024. Vol. 8, No. 24. Art. 2400551. DOI: 10.1002/solr.202400551.

16. Bahaidarah H., Subhan A., Gandhidasan P., Rehman S. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions // Energy. 2013. Vol. 59. P. 445–453. DOI: 10.1016/j.energy.2013.07.050.

17. Chow T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology // Applied Energy. 2010. Vol. 87, no. 2. P. 365–379. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.06.037.

18. Кирпичникова И.М. Сравнительный анализ генерации электрической энергии фотоэлектрическими модулями в различных температурных условиях / И.М. Кирпичникова, Д.А. Эвок, И.Б. Махсумов // Электричество. 2023. № 11. С. 34-41. DOI 10.24160/0013-5380-2023-11-34-41.

19. Щеклеин С.Е., Немихин Ю.Е., Велькин В.И., Власов В.В., Коржавин С.А., Серкова Е.В. Исследование эффективности солнечных фотоэлектрических преобразователей в натурных условиях // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 3. С. 55–58.

20. Shcheklein S.E., Matveev A.V., Beloborodov I.A., Nemikhin Y.E., Vlasov V.V. Study of Photovoltaic Grid-Connected Station Efficiency in the Annual Cycle // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). 2016. № 11–12. P. 37–51. DOI: 10.15518/isjaee.2016.11-12.037-051.

21. Солнечные фотоэлектрические станции: монография / Р.А. Амерханов, О.В. Григораш, И.Б. Самородов [и др.]. Краснодар: КубГАУ, 2017. 206 с.

22. Renewable Capacity Statistics 2026. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2026. 68 p. ISBN 978-92-9260-725-8.

РӮЙХАТИ ИНТИШОРОТИ АСОСӢ АЗ РӮЙИ МАВЗУИ ДИССЕРТАТСИЯ:

Мақолаҳои дар маҷаллаҳои тақризшавандае, ки аз ҷониби Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Комиссияи олии аттестатсионии назди Вазорати илм ва таҳсилоти олии Федератсияи Русия эътироф шудаанд, нашршуда:

[1-М]. **Давлатзода А.Н.** Методика расчёта мощности солнечной системы автономного типа на примере электроснабжения частного дома [Текст] / И.Б. Махсумов, Н.Х. Одинаев, **А.Н. Давлатзода,** К.Ш. Шокиров // Журнал «Окружающая среда и энерговедение» (ОСЭ). – 2024. – № 2(22). – С. 79-97.

[2-М]. **Давлатзода А.Н.** Распределенная генерация и её влияние на режим работы электрической сети [Текст] / Д.Т. Исозода, И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода** // Научный журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана № 4(3). – Душанбе, 2024 г. – С. 110-117. – ISSN 2789-0953.

[3-М]. **Давлатзода А.Н.** Анализ производительности автономных солнечных электростанций с учётом экологических аспектов с применением программного пакета PVsyst в условиях южных регионов Республики Таджикистан [Текст] / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** М.Б. Холназаров // Журнал «Окружающая среда и энерговедение» (ОСЭ). – 2025. – № 1(25). – С. 106-128. – DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-106-128. ISSN 2658-6703.

[4-М]. **Давлатзода А.Н.** Влияние изменчивости солнечной инсоляции на эффективность фотоэлектрических систем в условиях юга Таджикистана [Текст] / И.Б.

Махсумов, Д.Т. Исозода, **А.Н. Давлатзода** // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 3(71). – С. 5-13. – ISSN 2520-2227.

[5-М]. **Davlatzoda A.N.** Performance Analysis of Autonomous Solar Power Plants Using the PVsyst Software Package Under the Conditions of the Southern Regions of the Republic of Tajikistan [Текст] / I.B. Makhsumov, **A.N. Davlatzoda** // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2025. – Vol. 18, No. 6. – P. 763-777. – ISSN 2313-6057.

Мақолаҳои дар маҷаллаҳои илмии шомили пойгоҳҳои наукометрии Scopus ва Web of Science нашршуда:

[6-М]. **Davlatzoda A.N.** Integration of Solar Power Plants into the Power Systems of Central Asia / I.B. Makhsumov, D.S. Silemonov, **A.N. Davlatzoda** // 2026 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, Russian Federation, 17-23 May 2026. – P. 1-5. DOI:10.1109/ICIEAM69213.2026.11549706.

Мақолаҳои дар дигар маҷаллаҳо нашршуда:

[7-М]. **Давлатзода А.Н.** Влияние деградации на эффективность работы фотоэлектрических модулей / И.Б. Махсумов, У.Х. Джалилов, **А.Н. Давлатзода,** О.Ҷ. Кобулов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Инженерные исследования, инновации и инвестиции в области энергетики и промышленности». – Институт энергетики Таджикистана, р-н. Кушониён, 25 апреля 2023 г. – С. 119-124.

[8-М]. **Давлатзода А.Н.** Деградация фотоэлектрических модулей: причины и последствия / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** З.С. Рахимов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Энергетика: состояние и перспективы развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 20 декабря 2023 г. – С. 241-248.

[9-М]. **Давлатзода А.Н.** Развития малой гидроэнергетики путь к защите окружающей среды и экологии / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** Н.М. Раупов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Энергетика: состояние и перспективы развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 20 декабря 2023 г. – С. 249-257.

[10-М]. **Давлатзода А.Н.** Понимание деградации солнечных панелей, её причин и последствий / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** С.О. Ибрагимов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Энергетика ключевое направление развития национальной экономики». – Институт энергетики Таджикистана, р-н. Кушониён, 22 декабря 2023 г. – С. 51-57.

[11-М]. **Давлатзода А.Н.** Понимание основ систем распределенной генерации и перспектив её развития / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** К.Ш. Шокиров // Материалы IX Международной научно-практической конференции: «Наука – основа инновационного развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 18-19 апреля 2024 г. – С. 10-14.

[12-М]. **Давлатзода А.Н.** Влияние распределенной генерации на работу электрической сети / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** К.Ш. Шокиров // Материалы IX Международной научно-практической конференции: «Наука – основа инновационного развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 18-19 апреля 2024 г. – С. 14-18.

[13-М]. **Давлатзода А.Н.** Оценка эффективности солнечных панелей на крышах в условиях городской застройки / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** Б.В. Худоназаров, Д.С. Силемонов // Булатовские чтения: сборник статей IV Всероссийской с международным участием молодёжной конференции. – Томск, 10-12 декабря 2024 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 482-485.

[14-М]. **Давлатзода А.Н.** Влияние температурных и эксплуатационных факторов на эффективность солнечных модулей / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** З.С. Рахимов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Развитие энергетической

отрасли Таджикистана в период независимости». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 7 апреля 2025 г. – С. 228-235.

[15-М]. **Давлатзода А.Н.** Комплексный анализ факторов окружающей среды, влияющих на работу солнечных элементов: накопление пыли, температура окружающей среды и влажность / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** Н.Х. Одинаев // Материалы Международной научно-практической конференции: «Развитие энергетической отрасли Таджикистана в период независимости». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 7 апреля 2025 г. – С. 236-245.

[16-М]. **Давлатзода А.Н.** Комплексное исследование факторов окружающей среды, влияющих на эксплуатацию солнечных элементов: пылеобразование, температура и влажность / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** И.С. Носиров // Материалы II Международной научно-практической конференции: «Цифровая индустрия и энергетическое развитие глазами ученых и исследователей». – Институт энергетики Таджикистана, р-н. Кушониён, 25 апреля 2025 г. – С. 62-69.

[17-М]. **Давлатзода А.Н.** Энергетический ландшафт Центральной Азии и роль возобновляемых источников энергии в трансформации региональных энергосистем / И.Б. Махсумов, А.Н. Давлатзода, Б.М. Хасанзода // Научно-технический журнал «Тепловые электрические станции». – 2026. – № 1(5). – С. 10-17. ISSN 3033-5590.

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ ТАДЖИКИСТАНА

УДК 621.311.243:519.87

На правах рукописи



Давлатзода Абуфазл Нусратулло

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ФАКТОРОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3. Энергетика и электротехника (2.3.4. Электрические станции и электроэнергетические системы)

Кушониён – 2026

Диссертация выполнена на кафедре альтернативных источников энергии Института энергетики Таджикистана

Научный руководитель:	**Бурхонзода Илхом Бурхон,** кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой альтернативных источников энергии Института энергетики Таджикистана
Официальные оппоненты:	**Юлдашев Зарифджан Шарифович,** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электрификации и автоматизации сельского хозяйства Таджикского аграрного университета имени Шириншоха Шотемура
	Касобов Лоик Сафарович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими
Ведущая организация:	Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана (НАНТ)

Защита диссертации состоится «24» ноября 2026 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 6D.KOA-083 по защите кандидатских диссертаций при Институте энергетики Таджикистана по адресу: 735162, Республика Таджикистан, Хатлонская область, Кушониёнский район, посёлок городского типа Бохтариён, улица Н. Хусрава, 73. E-mail: messi.ilhom@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института энергетики Таджикистана и на сайте организации https://tpei.tj/shuroi–dissertatsioni/

Автореферат разослан «____»_____2026 г.

И. о. учёного секретаря
диссертационного совета,
кандидат технических наук Юсуфи Д.Ю.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Сегодня развитие энергетики всё больше связано с поиском надёжных и разнообразных источников электрической энергии. В этих условиях возобновляемые источники энергии становятся одним из важных направлений энергетического развития, среди которых особенно активно развивается солнечная фотоэлектрическая энергетика. Её развитие обусловлено наличием значительного технического потенциала солнечной энергии, снижением стоимости фотоэлектрического оборудования и расширением сферы применения солнечных электростанций.

Значительная часть данного прироста приходится на солнечную и ветровую энергетику, что свидетельствует об изменении структуры мировой энергетики в сторону более широкого использования возобновляемых источников энергии.

Согласно данным Международного энергетического агентства (IEA), в 2025 году годовой прирост установленной мощности солнечных фотоэлектрических электростанций впервые превысил 600 ГВт, а их суммарная установленная мощность в мире достигла примерно 2800 ГВт. При этом солнечная фотоэлектрическая энергетика обеспечила более трёх четвертей прироста новых мощностей возобновляемых источников энергии. Таким образом, производство электрической энергии с использованием солнечных фотоэлектрических электростанций остаётся одним из основных направлений развития современной энергетики.

Для Республики Таджикистан развитие солнечной энергетики имеет особое значение в связи с необходимостью дальнейшей диверсификации структуры производства электрической энергии, повышения надёжности электроснабжения и эффективного использования значительного потенциала солнечной радиации. Природно-климатические условия республики характеризуются значительной продолжительностью солнечной сияния и высоким уровнем солнечной радиации (более 300 солнечных дней в году), что создаёт благоприятные предпосылки для развития солнечной энергетики и ввода новых мощностей за счёт строительства СЭС.

Актуальность рассматриваемой проблемы возрастает в связи с переходом Республики Таджикистан от применения отдельных фотоэлектрических установок малой мощности к развитию крупномасштабных солнечных электростанций. В 2025 году началось строительство солнечных электростанций в Аштинском районе Согдийской области и Джайхунском районе Хатлонской области общей установленной мощностью 500 МВт.

При эксплуатации фотоэлектрических электростанций в условиях Таджикистана на их работу влияют различные климатические и эксплуатационные факторы, которые необходимо учитывать. к основным из них относятся интенсивность солнечной инсоляции. температура окружающей среды, её изменения в течение суток и года, а также запылённость поверхности ФЭМ.

Для южных регионов республики особенно характерно сочетание высокой солнечной радиации с повышенной температурой и сухим климатом.

Температурный фактор непосредственно влияет на энергетические показатели фотоэлектрических модулей (ФЭМ). При повышении температуры ФЭМ изменяются их основные электрические параметры, прежде всего напряжение и максимальная мощность. В результате фактическая энергетическая эффективность модулей может существенно отличаться от значений, приведённых в паспортных характеристиках. Вместе с тем высокая интенсивность солнечной радиации, способствующая увеличению производства фотоэлектрической энергии, одновременно приводит к дополнительному нагреву модулей.

В условиях жаркого климата температура ФЭМ может значительно превышать стандартное значение 25 ^{o}C, принимаемая при определении их электрических характеристик в стандартных условиях испытаний (STC). Повышение рабочей температуры приводит к снижению выходной мощности модулей, и в некоторых условиях потери мощности, обусловленные температурным воздействием, могут достигать 15-25 %. По этой

причине расчёты, основанные исключительно на стандартных условиях STC, не всегда позволяют с необходимой точностью оценить фактическое производство электрической энергии фотоэлектрическими электростанциями в условиях жаркого климата. В результате температура ФЭМ изменяется в течение суток и года, что приводит к соответствующему изменению их электрических характеристик и вырабатываемой электрической энергии.

Другим существенным эксплуатационным фактором для условий Республики Таджикистан является запыленность поверхности ФЭМ. Накопление пыли уменьшает количество солнечной радиации, поступающей на поверхность ФЭМ, и может приводить к снижению производства электрической энергии.

В связи с этим для достоверной оценки энергетической эффективности Фотоэлектрических электростанций недостаточно учитывать только установленную мощность оборудования, солнечную радиацию и нормативные характеристики ФЭМ. Необходимо установить количественные взаимосвязи между климатическими параметрами, температурой ФЭМ, изменением их электрических характеристик, энергетическими потерями и фактическим производством электрической энергии.

Данная проблема приобретает особую значимость при проектировании и эксплуатации крупномасштабных солнечных электростанций. При увеличении установленной мощности солнечной электростанции точность расчётов приобретает особое значение. Даже небольшое отличие фактических условий работы от принятых при расчёте параметров может повлиять на количество электроэнергии, вырабатываемой станцией за год. По этой причине при проектировании солнечных электростанций необходимо учитывать реальные условия их работы, а в процессе эксплуатации сопоставлять расчётные значения с фактическими показателями выработки.

При расчёте энергетических показателей фотоэлектрических электростанций необходимо учитывать не только номинальные характеристики фотоэлектрических модулей (ФЭМ), но и условия, в которых они работают. В частности, изменение температуры и других климатических параметров может влиять на мощность модулей и выработку электроэнергии. С помощью компьютерного моделирования можно оценить влияние этих факторов, определить основные потери энергии и установить, насколько размещение и ориентация модулей соответствуют условиям эксплуатации. Полученные результаты позволяют более обоснованно оценивать ожидаемую выработку электроэнергии.

Для Республики Таджикистан эта задача имеет особое значение. Страна обладает значительным потенциалом солнечной энергии, однако высокая интенсивность солнечного излучения не всегда обеспечивает работу фотоэлектрических модулей с максимальной эффективностью. В летний период их температура может существенно превышать температуру окружающего воздуха. Кроме того, на работу оборудования влияет запылённость поверхности модулей. Всё это необходимо учитывать при расчёте энергетических показателей солнечных электростанций. Особое внимание следует уделять температурному фактору, поскольку, нагрев фотоэлектрических модулей приводит к изменению их электрических характеристик и может снижать фактическую выработку электроэнергии.

В тоже время важность настоящего исследования также определяется развитием солнечной энергетики в Таджикистане и реализацией проектов по строительству солнечных электростанций суммарной установленной мощностью 500 МВт. По мере увеличения мощности вводимых объектов возрастает необходимость в достоверной оценке их будущей выработки. Поэтому совершенствование методов расчёта с учётом температурных и климатических факторов представляет практический интерес как при проектировании новых электростанций, так и при оценке эффективности их дальнейшей эксплуатации. В связи с этим совершенствование методов математического моделирования с учётом температурного воздействия представляет практический и научный интерес для развития солнечной энергетики Республики Таджикистан. Таким образом, актуальность исследования обусловлена особенностями эксплуатации фотоэлектрических

электростанций в климатических условиях Республики Таджикистана, где повышенные температуры могут существенно изменять их фактические энергетические показатели. Применение математических моделей, учитывающих температурное состояние ФЭМ, даёт возможность более точно определить объём вырабатываемой электроэнергии, выявлять связанные с нагревом потери и учитывать их при выборе параметров оборудования, проектировании и последующей эксплуатации ФЭУ.

С учётом изложенного исследование работы фотоэлектрических электростанций на основе математического и компьютерного моделирования для оценки их энергетической эффективности с учётом температурных факторов в условиях Республики Таджикистан и жаркого климата представляет собой актуальную научно-техническую задачу, имеющую важное практическое значение.

Степень изученности научной темы. Вопросы развития солнечной энергетики, повышения энергетической эффективности фотоэлектрических систем и влияния климатических факторов на выработку электроэнергии исследованы в трудах отечественных и зарубежных учёных. Общим вопросам использования возобновляемых источников энергии посвящены работы Д.С. Стребкова [1], П.П. Безруких [2], В.В. Елистратова [3] и других исследователей. Аспекты моделирования фотоэлектрических систем и оценки их эффективности рассмотрены в исследованиях J. Duffie [4], Tze-Zhang Ang [5] и J.L. Holechek [6].

Вопросы зависимости температуры фотоэлектрических модулей от солнечной радиации, температуры окружающей среды и условий эксплуатации исследованы в работах H. Thomas [7], E. Skoplaki [8] и J.A. Palyvos [9]. Аспекты математического моделирования и прогнозирования выработки электроэнергии фотоэлектрическими электростанциями отражены в исследованиях М.Г. Тягунова [10], С.Г. Обухова [11] и И.А. Плотникова [12]. Вместе с тем вопросы энергетических потерь, обусловленных загрязнением поверхности модулей, изучены в работах L. Michel [13], M.L. Adekanbi [14] и P. Dixit [15].

Влияние повышенной температуры на электрические параметры и эффективность фотоэлектрических модулей, а также способы снижения температурных потерь рассмотрены в исследованиях A. Hasan [16], H.M.S. Bahaidarah [17], И.М. Кирпичниковой [18] и других учёных. Эффективность фотоэлектрических систем в регионах с жарким климатом также изучалась в работах С.Е. Щеклеина [19], В.И. Велькина [20] и О.В. Григораша [21].

Анализ указанных направлений исследований показывает, что общие вопросы моделирования фотоэлектрических систем и влияния климатических факторов на их работу уже изучены. Вместе с тем комплексная оценка влияния рабочей температуры модулей на энергетические показатели фотоэлектрических электростанций в климатических условиях Республики Таджикистан требует дополнительных исследований. В частности, сохраняется необходимость сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными и определения изменений энергетических показателей.

В связи с этим настоящее диссертационное исследование направлено на изучение данной проблемы с использованием математического моделирования, экспериментальных исследований и компьютерных программ. Научная направленность исследования заключается в оценки влияния температуры на электрические и энергетические параметры модулей, а также в обосновании возможностей повышения достоверности расчётов выработки электроэнергии в условиях жаркого климата. Результаты исследования могут иметь научное и практическое значение для совершенствования методов оценки энергетической эффективности солнечных электростанций в Республике Таджикистан.

Связь исследования с программами, проектами и научными темами. Диссертационное исследование тесно связано с приоритетными направлениями государственной политики в области энергетики, развития возобновляемых источников энергии и точных наук и соответствует целям и задачам «Национальной стратегии развития Республики Таджикистан на период до 2030 года», Закона Республики Таджикистан «Об

энергетике» от 19 июля 2022 года, № 1909, «Программы развития возобновляемых источников энергии на 2023-2027 годы», утвержденной постановлением Правительства Республики Таджикистан от 1 марта 2023 года, № 51, а также постановления Правительства Республики Таджикистан от 30 июля 2020 года, № 427 «Об объявлении двадцатилетия изучения и развития естественных, точных и математических наук».

Тема диссертации, направленная на моделирование работы солнечных электростанций с учётом влияния температурных факторов и повышение эффективности использования солнечной энергии, непосредственно связана с указанными приоритетными направлениями и имеет научное и практическое значение для развития научно-методических основ эффективного использования солнечной энергии в Республике Таджикистан.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель диссертационного исследования – исследовать влияние температурных условий на работу фотоэлектрических модулей и на этой основе разработать математические модели, позволяющие более точно определить энергетические характеристики и объём производства электрической энергии фотоэлектрическими электростанциями.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертационном исследовании определены и решены следующие задачи:

1. Проанализировать современное состояние и основные методы моделирования солнечных электростанций, определить факторы, влияющие на их энергетическую эффективность, с учётом температурного воздействия.
2. Экспериментально исследовать влияние температуры окружающей среды и рабочей температуры фотоэлектрических модулей на их энергетические характеристики и установить зависимость выходной мощности от температуры.
3. Смоделировать и оценить энергетические показатели солнечной электростанции с использованием программного комплекса PVsyst на основе технических параметров системы и климатических условий района исследования.
4. Разработать математическую модель работы фотоэлектрических установок с учётом влияния температурных факторов и реализовать модель в среде MATLAB/Simulink
5. Оценить эффективность термозащиты, разработать методику учёта температурного воздействия на параметры фотоэлектрических модулей и сформулировать рекомендации для условий жаркого климата, в том числе Республики Таджикистан.

Объект исследования. Фотоэлектрические электростанции и их модули при различных значениях температуры окружающей среды и рабочей температуры.

Предмет исследования. Влияние температурных условий на электрические и энергетические характеристики фотоэлектрических модулей и производство электрической энергии, а также математические модели и расчётные методы оценки данного влияния и выявленные закономерности его изменения.

Теоретические основы исследования. Методологическую базу работы формируют положения теории фотоэлектрического преобразования солнечного излучения в электрическую энергию, а также закономерности изменения электрических характеристик ФЭМ при воздействии температуры. При построении регрессионных зависимостей применялся метод наименьших квадратов. Исследование рабочих процессов фотоэлектрических электростанций и количественная оценка температурного воздействия осуществлялись посредством имитационного моделирования с использованием разработанных математических моделей.

Научная новизна. В результате проведённого исследования впервые получены следующие новые научные результаты:

1. Выявлено влияние температуры окружающей среды и рабочей температуры фотоэлектрических модулей на их электрические и энергетические характеристики.

2. Разработана математическая модель фотоэлектрических модулей, учитывающая влияние температурных факторов и позволяющая оценивать изменение их электрических и энергетических параметров при различных значениях рабочей температуры.

3. Установлена количественная зависимость рабочей температуры фотоэлектрических модулей от температуры окружающей среды. На её основе усовершенствована модель фотоэлектрической установки в среде MATLAB/Simulink, с помощью которой оценено изменение выходной мощности и выработки электроэнергии при различных температурных условиях.

4. Разработан расчётный подход к оценке температурного воздействия на фотоэлектрические модули, позволяющий определять изменение их электрических характеристик и рассчитывать температурные потери при различных значениях рабочей температуры.

5. Разработана математическая модель термозащиты фотоэлектрических модулей и оценена её эффективность при повышенной температуре окружающей среды. Установлено, что применение термозащиты позволяет снизить температуру поверхности фотоэлектрического модуля до 3,53 ^{o}C и уменьшить отрицательное влияние нагрева на его энергетические показатели.

Положения, выносимые на защиту:

1. На основе результатов натурных экспериментальных исследований установлены экспериментальные и регрессионные зависимости рабочей температуры фотоэлектрических модулей от температуры окружающей среды для двух условий эксплуатации с термозащитой и без неё. Выявлены закономерности изменения рабочей температуры модулей в зависимости от температуры окружающей среды. Полученные результаты создают основу для оценки влияния температурных факторов на электрические и энергетические параметры фотоэлектрических модулей в климатических условиях Республики Таджикистан.

2. Разработана методика расчёта и оценки электрических и энергетических параметров фотоэлектрических модулей с учётом влияния температурных факторов и применения термозащиты. Математическая модель работы модуля реализована в среде MATLAB/Simulink. Установлено, что при температуре окружающей среды 45 ^{o}C применение термозащиты позволяет снизить рабочую температуру модуля с 62,13 ^{o}C, обеспечивая её снижение на 3,53 ^{o}C. Полученный результат свидетельствует о положительном влиянии термозащиты на температурные условия эксплуатации фотоэлектрического модуля.

3. В программной среде PVsyst разработана имитационная модель автономной фотоэлектрической системы для климатических условий района Кушониён. Оценено влияние климатических параметров, температурных факторов и электрической нагрузки на энергетические показатели системы. На основе результатов моделирования обоснована техническая конфигурация автономной фотоэлектрической системы, определены её энергетический баланс и доля солнечной энергии в покрытии энергетической нагрузки потребителей.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Теоретическая значимость исследования определяется полученными расчётными зависимостями, позволяющими учитывать температурное воздействие при анализе электрических характеристик ФЭМ. Установленные закономерности влияния температуры окружающей среды и рабочей температуры на электрические и энергетические параметры ФЭМ, экспериментальные и регрессионные зависимости, а также методика расчёта и оценки параметров модулей с учётом температурного воздействия создают научную основу для повышения точности моделирования и оценки производства электрической энергии солнечными электростанциями. Разработанная модель в среде MATLAB/Simulink и результаты моделирования в программном комплексе PVsyst могут быть использованы для

исследования влияния рабочей температуры и температурных потерь на электрические и энергетические показатели фотоэлектрических систем.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов при проектировании, расчёте и оценке энергетической эффективности солнечных электростанций в условиях жаркого климата, в том числе в Республике Таджикистан. Предложенная методика позволяет рассчитывать электрические и энергетические параметры ФЭМ с учётом фактической рабочей температуры и оценивать влияние термозащиты на их работу. Моделирование в программных комплексах PVsyst MATLAB/Simulink может быть использовано для выбора параметров основного оборудования солнечной электростанции, оценки производства электрической энергии с учётом нагрузки потребителей и анализа энергетических потерь. Результаты исследования также имеют практическое значение для разработки научно-практических рекомендаций по повышению эффективности фотоэлектрических систем в регионах при высокой температурной окружающей среды.

Степень достоверности результатов диссертации. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием результатов натурных экспериментальных исследований, регрессионной обработкой экспериментальных данных и математическим моделированием в программных комплексах PVsyst и MATLAB/Simulink. Достоверность расчётных результатов подтверждена путем сопоставления режимов работы фотоэлектрических модулей с термозащитой и без неё, а также оценки влияния термозащиты на электрические и энергетические параметры модулей. Согласованность экспериментальных, расчётных и модельных результатов, а также совместное использование программных комплексов PVsyst и MATLAB/Simulink для оценки энергетических показателей и электрических и температурных параметров фотоэлектрической системы подтверждают достоверность полученных результатов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим положениям паспорта научной специальности 2.3. Энергетики и электротехника (2.3.4. Электрические станции и электроэнергетические системы):

пункту 2. «Разработка научных основ (методом) исследования общих характеристик, условий функционирования и методов расчёта, алгоритмов и программ выбора оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок, функционирующих на органическом и альтернативном топливе, а также на основе возобновляемых источников энергии…» - в части исследования влияния температуры на электрические и энергетические характеристики фотоэлектрических модулей и разработки метода их расчёта с учётом температурного воздействия и термозащиты.

пункту 4. «Разработка, исследование и совершенствование существующих технологий, освоение новых технологий и оборудования для производства электрической и тепловой энергии, использования органического и альтернативного топлива и возобновляемых источников энергии… повышение надежности и увеличение срока службы элементов энергетических систем…» - в части исследования и совершенствования технологий использованная солнечной энергии посредством оценки влияния высокий температуры на электрические и энергетические параметры фотоэлектрических модулей, разработка термозащиты и определения её влияния на рабочую температуру и энергетические показатели модулей с целью снижения температурных потерь и повышения энергетической эффективности их работы.

пункту 11. «Математическое моделирование, численные и натурных исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках, работающих на органическом и альтернативном топливе и возобновляемых источниках энергии…» - в части математического и имитационного моделирования работы фотоэлектрических модулей с учётом температурных факторов в среде MATLAB/Simulink,

а также моделирования фотоэлектрической электростанции в PVsyst с учётом климатических условий, электрической нагрузки и энергетических потерь.

Личный вклад соискателя учёной степени заключается в определении цели и задач исследования, проведении экспериментальных исследований, сборе и обработке натурных данных, установлении экспериментальных зависимостей электрических параметров фотоэлектрических модулей от температуры, разработке математической модели и методики расчёта с учётом влияния температурных факторов. Соискатель непосредственно участвовал в разработке модели термозащиты, проведении моделирования в программных комплексах PVsyst и MATLAB/Simulink, анализе и сопоставлении экспериментальных и расчётных результатов, а также в формулировании выводов и разработке научно-практических рекомендаций.

Апробация и реализация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы прошли апробацию на республиканских и международных научно-практических конференциях. Отдельные результаты исследования были представлены и обсуждены на конференциях, посвященных вопросам энергетики, инновационного развития и промышленной инженерии, проходивших в Таджикистане и Российской Федерации в 2023-2026 годах. В их числе международные конференции «Энергетика: состояние и перспективы развития» (Душанбе, 2023,2025), «Развитие энергетики Таджикистана в период независимости» (Душанбе, 2025), «Цифровая индустриализация и развитие энергетики глазами ученых и исследователей» (Кушониён,2025), а также IV Всероссийская молодежная конференция с международным участием «Булатовские чтения» (Томск, 2024) и международная конференция ICIEAM 2026 (Сочи, 2026). Результаты исследования также обсуждались на научно-практических конференциях Института энергетики Таджикистана и Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими.

Публикация по теме диссертации. Результаты выполненного исследования представлены в 17 научных публикациях. В их числе 5 статей, опубликованных в научных изданиях, входящих в перечень ВАК при Президенте Республики Таджикистан и ВАК Российской Федерации, 1 публикация в материалах научной конференции, индексируемой в международных библиографических базах данных IEEE и Scopus, а также 11 публикаций в сборниках материалов международных научных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объём работы составляет 186 страниц печатного текста, в том числе 152 страницы основного текста диссертации. Диссертация содержит 43 рисунка, 10 таблиц и 4 приложения. Список использованной литературы включает 137 неименованный.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении «обоснована актуальность темы исследования, охарактеризована степень её изученности, определены цель и задачи, объект и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретические и методологические основы, теоретическая и практическая значимость исследования, степень достоверности полученных результатов, их апробация и реализация, также положения, выносимые на защиту».

В первой главе ***«Аналитический обзор современных методов моделирования солнечных электростанций»*** «проанализировано современное состояние солнечной энергетики». «А также методы моделирования фотоэлектрических электростанции, программные средства моделирования, а также влияние климатических факторов на энергетические показатели солнечных электростанций». Основными задачами анализа являлись определение наиболее подходящих методов моделирования и обоснование необходимости учёта влияния температурных факторов при оценки фактического производства электрической энергии фотоэлектрическими электростанциями.

Состояние развития солнечной энергетики. В данном разделе рассматривается современное состояние солнечной энергетики и её роль в развитии возобновляемых источников энергии. В последние годы число солнечных электростанций (СЭС) во многих странах заметно увеличилось. Это обусловлено растущим спросом на электроэнергию и стремлением расширить использование источников энергии, не связанных с сжиганием ископаемого топлива.

По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), к концу 2025 года общая установленная мощность возобновляемых источников энергии в мире достигла 5149 ГВт. За год этот показатель увеличился на 692 ГВт. Значительная часть прироста пришлась на солнечную энергетику: её установленная мощность составила около 2392 ГВт. Эти данные показывают, что солнечная энергетика занимает одно из ведущих мест среди направлений развития возобновляемой энергетики [источник: IRENA, 2026].

Для Республики Таджикистан использование солнечной энергии представляет особый интерес. Большое количество солнечных дней в году и высокий уровень солнечной радиации создают благоприятные условия для строительства и эксплуатации фотоэлектрических электростанций. Вместе с тем при оценке возможностей солнечной энергетики необходимо учитывать не только природный потенциал страны, но и особенности работы фотоэлектрического оборудования в местных климатических условиях. В частности, важное значение имеют температура окружающей среды, нагрев модулей и запылённость их поверхности, поскольку эти факторы могут влиять на фактическую выработку электроэнергии. Вместе с тем в диссертации отмечается, что по мере реализации крупных солнечных энергетических проектов возрастает необходимость повышения точности расчёта и прогнозирования производства электрической энергии.

За последние годы солнечная энергетика заметно увеличила свою долю в общей установленной мощности ВИЭ. По видам производства электрической энергии (рисунок 1) на долю солнечной энергетики приходится 2392 ГВт, или около 47% общей установленной мощности возобновляемых источников энергии. Данный показатель характеризует солнечную энергетику как наиболее масштабный и динамично развивающийся сегмент возобновляемой энергетики с высоким потенциалом дальнейшего расширения.



Рисунок 1. – Структура мировой установленной мощности ВИЭ. Источник: IRENA [22].

Современные методы моделирования фотоэлектрических электростанций. Анализ научной литературы и материалов исследований показал, что моделирование фотоэлектрических систем осуществляется с использованием нескольких основных подходов. В данной главе рассмотрены физико-математический, статистический, имитационный и гибридный (комбинированный) подходы.

Физико-математический подход позволяет детально учитывать физические процессы, протекающие в фотоэлектрических модулях, и характеризуется высокой точностью расчётов. Его недостатками являются необходимость использования значительного объема исходных данных и высокие вычислительные затраты.

Статистический подход позволяет сравнительно быстро оценить ожидаемую выработку электроэнергии на основе имеющихся данных. При этом точность полученных результатов зависит от полноты и достоверности исходной информации. Имитационный подход основан на моделировании процессов, происходящих при работе фотоэлектрической системы, и даёт возможность проследить изменение её параметров во времени. Гибридный подход предполагает совместное использование нескольких методов, что позволяет учитывать различные факторы, влияющие на выработку электроэнергии.

Основные особенности, преимущества и ограничения рассмотренных подходов обобщены в таблице 1, что позволяет сопоставить их возможности и определить области применения каждого из них.

Таблица 1. – Сравнительная характеристика методов моделирования фотоэлектрических электростанций

Методы моделирования	**Преимущества**	**Ограничения**	**Область применения**
Физико-математический	Высокая точность, учитывающая физические процессы	Требует значительных исходных данных	Научные исследования, оптимизация параметров солнечной электростанции
Статистический	Простота реализации, низкие вычислительные затраты	Зависимость от качества данных	Быстрые оценки и прогнозы
Имитационный	Учёт динамики времени	Сложность настройки моделей	Анализ режимов работы, прогнозирование выработки электроэнергии
Гибридный	Высокая точность, адаптивность	Сложность реализации	Современные исследования, интеллектуальные системы

Структура моделирования фотоэлектрической электростанции. В первой главе диссертации рассмотрена иерархическая структура моделирования фотоэлектрической электростанции. Моделирование может проводиться на разных уровнях: от отдельного фотоэлектрического элемента (ФЭЭ) и модуля до группы модулей, преобразующего оборудования, систем управления и накопления энергии. На заключительном этапе рассматривается работа электростанции в составе энергосистемы.

Рассмотрение системы на нескольких уровнях позволяет оценить влияние характеристик отдельных компонентов на работу электростанции в целом. При этом учитываются потери в фотоэлектрических модулях и преобразующем оборудовании, а также условия эксплуатации. Особое внимание уделяется климатическим факторам, поскольку они могут изменять рабочие параметры фотоэлектрических модулей и влиять на выработку электроэнергии. Иерархическая структура моделирования представлена на рисунке 2. Она отражает последовательный переход от моделирования отдельных фотоэлектрических элементов и модулей к исследованию электростанции как части электроэнергетической системы.

Анализ программных средств моделирования. В первой главе также рассмотрены программные средства, применяемые для моделирования фотоэлектрических электростанций (табл. 2). Сравнение проведено для определения возможностей их

использования в рамках настоящего исследования. Рассмотрены PVGIS, PVsyst, PV*SOL, HelioScope, SAM, MATLAB/Simulink и HOMER Pro. При анализе учитывались назначение программ, основные расчётные возможности, преимущества и ограничения. Это позволило сопоставить их функциональные возможности и обосновать выбор программного средства для дальнейшего исследования.



Рисунок 2. – Иерархическая структура моделирования фотоэлектрической электростанции

По результатам сравнительного анализа программных средств для исследования автономной фотоэлектрической электростанции выбраны PVsyst и MATLAB/Simulink. Их применение позволяет оценить энергетические показатели установки и исследовать влияние температурных факторов на её работу. В последующих главах представлены результаты моделирования объекта исследования работы автономной фотоэлектрической электростанции. С учётом поставленных задач исследования выбранные программные средства признаны наиболее соответствующими целям и требованиям проводимого моделирования.

Таблица 2. – Сравнительный анализ программных средств моделирования фотоэлектрических электростанций

Программные инструменты	**Основная область применения**	**Основные характеристики**
PVGIS	Климатическая и первоначальная оценка проекта	Методологические данные
PVsyst	Проектирование и моделирование СЭС	Подробный расчёт энергии
PV*SOL	Расчёт интегрированной в здание фотоэлектрической электростанции	3D-моделирование
SAM	Технико-экономический анализ	Финансовое моделирование (NPV, IRR, LCOE)
HOMER Pro	Автономные и гибридные системы	Оптимизация структуры

Влияние климатических факторов на работу фотоэлектрической электростанции. Важная часть первой главы посвящена анализу климатических факторов. Установлено, что фактическое производство электрической энергии зависит от солнечной радиации, температуры окружающей среды, скорости ветра, облачности, влажности и загрязнения поверхности фотоэлектрических модулей, используемых в солнечных электростанциях.

Солнечная радиация как основной источник энергии непосредственно определяет уровень производства электрической энергии. При этом температура окружающей среды и рабочая температура модулей оказывают непосредственное влияния на их электрические параметры. Для засушливых и южных регионов Таджикистана загрязнение поверхности модулей также рассматривается как один из существенных факторов энергетических потерь. Для города Бохтара проанализированы сезонные климатические параметры, результаты которых представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Климатические параметры района исследования

Параметры	**В зимний период**	**В весенний период**	**В летний период**	**В осенний период**
Радиация (кВт·ч/м^2)	2,5-3,2	4,5-5,5	6,5-7,5	3,5-4,5
Температура (ºС)	8-2	12-20	28-38	15-25
Скорость ветра (м/с)	1,5-2,5	2,0-3,0	2,5-3,0	1,5-2,5

Согласно данным таблицы 3, летом солнечная радиация достигает 6,5-7,5 кВт·ч/м^2, температура 28-38 ºС, а скорость ветра 2,5-3,0 м/с. Полученные показатели подтверждают необходимость учёта температурного фактора при моделировании фотоэлектрических электростанций.

Одним из факторов, оказывающих отрицательное влияние на энергетическую эффективность фотоэлектрических электростанций, является загрязнение или запыление поверхности фотоэлектрических модулей. Для описания процесса накопления загрязнений предложены как линейная, так и экспоненциальная модели. При этом учитывается влияние атмосферных осадков как механизма частичного или полного очищения поверхности модулей. На основе полученных зависимостей предложена общая модель выходной мощности фотоэлектрической электростанции, учитывающая солнечную радиацию, температуру фотоэлектрического элемента и степень загрязнения поверхности модулей.

Для количественной оценки влияния загрязнения введен коэффициент загрязнения, характеризующий относительное снижение выходной мощности:

$$P_{eff}(t) = P_0(t) \cdot (1 - L_s(t)) \quad (1)$$

где: $P_{eff}(t)$ – фактическая мощность фотоэлектрической электростанции с учётом загрязнения; $P_0(t)$ – мощность при чистой поверхности фотоэлектрического модуля; $L_s(t)$ – относительные потери мощности вследствие загрязнения.

Накопление загрязнений на поверхности фотоэлектрических модулей в упрощённом виде можно описать линейной зависимостью:

$$L_s(t) = k \cdot t \quad (2)$$

где: (k) – коэффициент скорости загрязнения, зависящий от климатических и эксплуатационных условий; (t) – время работы фотоэлектрического модуля без очистки его поверхности.

Для более точного описания процесс накопления загрязнений применяют экспоненциальную зависимость, позволяющую учитывать постепенное замедление этого процесса по мере увеличения количества отложений на поверхности модуля:

$$L_s(t) = L_{max} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

где: ($L_{\max}$) – предельный уровень загрязнения поверхности фотоэлектрического модуля, соответствующий установившимися условиям накопления загрязняющих частиц.

Атмосферные осадки способствуют удалению пыли и других загрязнений с поверхности фотоэлектрических модулей. Степень очистки зависит от интенсивности осадков и характера загрязнений. Для учёта этого воздействия в расчётную модель вводится коэффициент восстановления, характеризующий степень уменьшения загрязнённости поверхности после выпадения осадков:

$$L_s(t^+) = L_s(t^-) \cdot (1 - \eta_{rain}) \quad (4)$$

где: $L_s(t^-)$ – уровень загрязнения поверхности фотоэлектрического модуля до выпадения осадков; $L_s(t^+)$ – уровень загрязнения после их выпадения; η_{rain} – коэффициент очистки, принимающий значения от 0 до 1 и характеризующий эффективность удаления загрязнений под воздействием осадков.

С учётом рассмотренных факторов влияние температуры, солнечного излучения и загрязнения поверхности на работу фотоэлектрической электростанции можно объединить в математической модели её выходной мощности, которая записывается следующим образом:

$$P(t) = P_{nom} \cdot G(t)/G_{STC} = [1 + \gamma (T_c(t) - T_{ref})] \cdot (1 - L_s(t)) \quad (5)$$

Где: P_{nom} – номинальная мощность фотоэлектрической электростанции; $G(t)$ – интенсивность солнечного излучения в текущий момент времени; $G_{SCT}(t)$ – интенсивность солнечного излучения в условиях STC, равная 1000 Вт/м^2; $T_C(t)$ – текущая температура ФЭМ; γ – температурный коэффициент мощности ФЭМ; T_{ref} – температура элемента в условиях STC, равная 25 ºС; $L_s(t)$ – текущий уровень загрязнения поверхности ФМЭ.

Математические модели и обоснование дальнейшего направления исследования. Для количественного учёта влияния температуры в моделях фотоэлектрических систем используется температурный коэффициент мощности. Также исследована эмпирическая модель определения температуры фотоэлектрического элемента на основе номинальной рабочей температуры элемента NOST.

Для условий жаркого климата установлено, что температура фотоэлектрических модулей может достигать 45-55 ºС и выше, что приводит к увеличению потерь мощности по сравнению со стандартными до 15-25 %. В связи с этим учёт температурного воздействия при моделировании имеет важное значение для повышения точности прогнозирования производства электрической энергии, выбора оборудования, разработки мероприятий по охлаждению и оптимизации работы фотоэлектрической системы.

Во второй главе ***«Теоретическое и экспериментальное исследование влияния температуры на энергетическую эффективность фотоэлектрических модулей»*** «исследовано влияние температурного режима на электрические и энергетические параметры фотоэлектрических модулей, а результаты теоретического анализа сопоставлены с данными экспериментальных исследований, полученными в реальных условиях эксплуатации».

Теоретические расчёты показали, что при нагреве ФЭМ в первую очередь уменьшается напряжение U_{OC} в том числе напряжение в точке максимальной мощности. Изменение тока при этом остаётся небольшим.

«Для использованного в исследовании модуля SOLARMODUL Aleo S19 HE 300 W Supercharged в стандартных условиях испытаний (STC) максимальная мощность составляет 300 Вт, коэффициент полезного действия 16,7%, напряжение в точке максимальной мощности 31,2 В, ток 9,63 А, напряжение холостого хода 39,4 В, а ток короткого замыкания (I_{sc}) 9,67 А. Температурный коэффициент напряжения составляет –0,29 %/К, а температурный коэффициент максимальной мощности –0,40 %/К».

Сравнительные расчёты (таблица 4) показали, что при повышении температуры фотоэлектрического элемента с 25 до 55 ºС максимальная мощность модуля снижается с

300 до 264 Вт, то есть расчётные потери мощности составляют около 12%. При этом напряжение в точке максимальной мощности снижается с 31,2 до 28,5 В, а напряжение холостого хода с 39,4 до 36,0 В, тогда как ток увеличивается незначительно. Полученные результаты обосновали необходимость экспериментальной проверки влияния температуры в реальных условиях эксплуатации.

Основные результаты экспериментальных (полевых) исследований. Экспериментальные исследования проведены на автономной солнечной электростанции установленной мощностью 10 кВт расположенной на территории Кушонёнского района Хатлонской области на базе Института энергетики Таджикистана. Экспериментальные исследования проводились на площадке, расположенной на высоте 419 м над уровнем моря, с географическими координатами 37,872° северной широты и 68,724° восточной долготы. В качестве объектов исследования использовались два монокристаллических фотоэлектрических модуля SOLARMODUL Aleo S19 HE номинальной мощностью 300 Вт.

В ходе экспериментов в реальных условиях эксплуатации измерялись электрические и температурные параметры модулей. Полученные данные использовались для оценки влияния температуры на их электрические характеристики и энергетическую эффективность при различных условиях работы.

Результаты сравнительного расчётного анализа характеристик исследуемого фотоэлектрического модуля представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Сравнение характеристик ФЭМ Aleo S19 HE 300 W в стандартных условиях испытаний (STC) и при реальной эксплуатации

Параметры модуля	Обозначения параметров	Стандартные условия испытаний (STC), 25 °C	Расчётные условия для Кушониёнского района (температура ФЭЭ 35 °C)	Расчётные условия для Кушониёнского района (температура ФЭЭ 55 °C)	Отклонение параметров при 55 °C, %
Максимальная мощность	P_{max}	300 Вт	288,0 Вт	264,0 Вт	-12,0 %
Напряжение в точке максимальной мощности	U_{mp}	31,2 В	30,3 В	28,5 В	-8,7 %
Ток в точке максимальной мощности	I_{mp}	9,97 А	9,68 А	9,77 А	-1,5 %
Напряжение холостого хода	U_{oc}	39,4 В	38,3 В	36,0 В	-8,6 %
КПД модуля	η	16,7 %	16 %	14,7 %	-12,0 %

Особенность эксперимента заключалась в использовании двух фотоэлектрических модулей в разных условиях эксплуатации: поверхность одного модуля регулярно очищалась от пыли и загрязнений, а на поверхности второго загрязнения накапливались естественным образом. Такой подход позволил сравнить их электрические и энергетические характеристики и оценить влияние запылённости на работу модулей.

Это позволило оценить не только непосредственное влияние температуры, но и совокупное воздействие высокой температуры и запыления поверхности модуля на его энергетические показатели.

Полевые измерения выполнялись в апреле 2023 года в течение нескольких дней. Ежедневные наблюдения проводились с 11:00 до 16:00, когда солнечная радиация и температура поверхности ФЭМ были наиболее высокими (рис. 3).

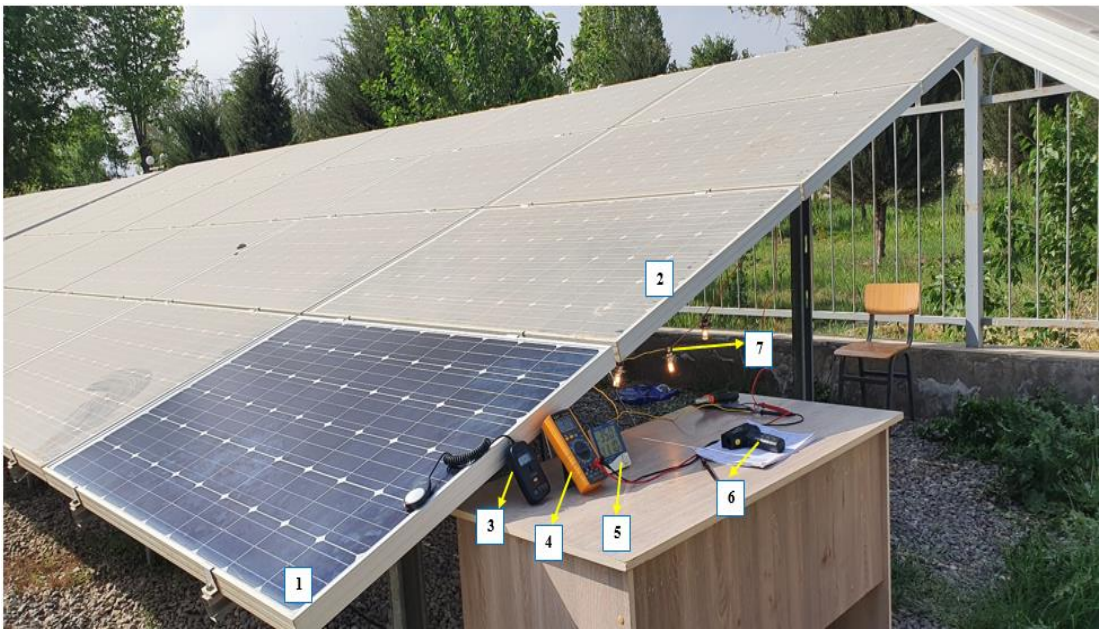


Рисунок 3. – «Общий вид экспериментальной установки для определения производства электрической энергии фотоэлектрическими модулями в условиях Кушониёнского района Республики Таджикистан: *1 – очищенный фотоэлектрический модуль; 2 – фотоэлектрический модуль с естественным загрязнением поверхности; 3 – цифровой люксметр MS6610; 4 – цифровой мультиметр CHY Victor VC890D; 5 – термометр-гигрометр TH90; 6 – инфракрасный термометр IR01D; 7 – галогенные лампы»*

Результаты полевых измерений показали, что температура поверхностей фотоэлектрических модулей значительно превышает температуру окружающего воздуха. При температуре воздуха 35-37 °C температура передней поверхности модуля достигала 55-60 °C, а температура задней поверхности в отдельные часы превышала 65 °C. Максимальный нагрев модулей наблюдался в период с 12:00 до 14:00, соответствующий периоду наиболее высокой интенсивности солнечной радиации.

Экспериментальные данные показали, что с ростом рабочей температуры модуля его напряжение заметно уменьшается, а ток изменяется незначительно. Это приводит к снижению выходной мощности, главным образом за счёт уменьшения напряжения (рис. 4).

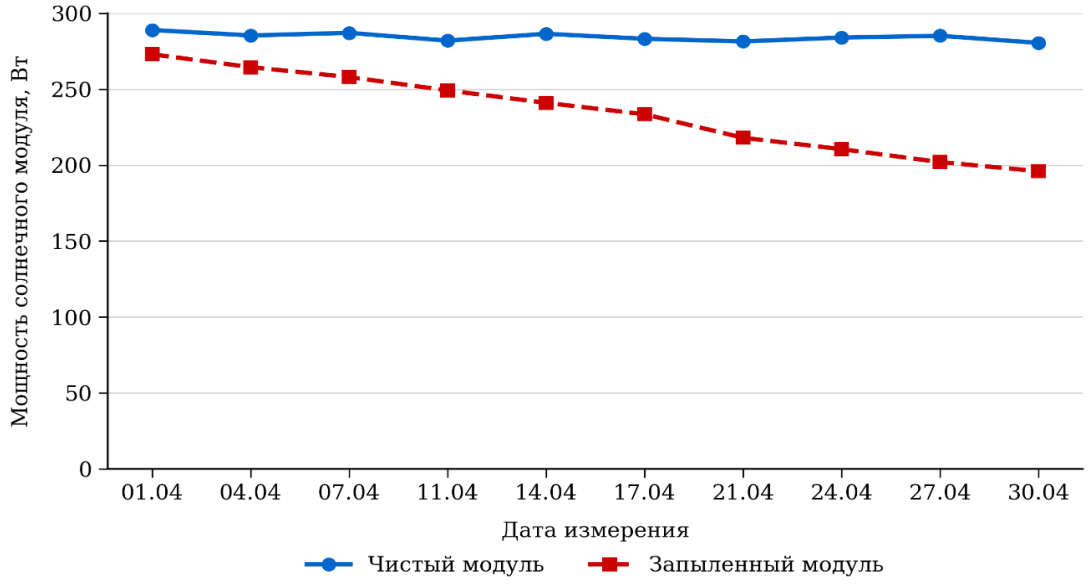


Рисунок 4. – Сравнительная динамика изменения выходной мощности очищенного и загрязнённого пылью ФЭМ в период проведения экспериментальных наблюдений

Особенно важные результаты получены при сравнении очищенного модуля с загрязнённым (рисунок 4). Установлено, что загрязненный модуль во всём исследованном диапазоне имел более низкую выходную мощность, причём наибольшие потери наблюдались в периоды максимального нагрева поверхности. Средняя мощность очищенного модуля в отдельные периоды составляла 280,0-289 Вт, тогда как мощность загрязненного модуля снижалась до 196-273 Вт. В условиях облачности и повышенной влажности воздуха снижение мощности выражено ещё сильнее.

На основе экспериментальных данных установлена зависимость выходной мощности фотоэлектрического модуля от температуры его поверхности. На рисунке 5 представлена экспериментальная зависимость выходной мощности модуля от температуры поверхности, которая показывает закономерное снижение мощности с повышением температуры. Для очищенного модуля выявлена выраженная отрицательная температурная зависимость: при температуре окружающего воздуха 32-37 °С, температура поверхности модуля достигала 53-62 °С. При этом повышение температуры поверхности сопровождалось снижением выходной мощности модуля. Экспериментальные результаты также показали, что загрязнение поверхности усиливает влияние температурного фактора.

Накопление пылевых отложений на поверхности модуля приводит, с одной стороны, к уменьшению количества солнечного излучения, достигающего фотоэлектрических элементов, а с другой к ухудшению условий теплоотдачи. При совместном воздействии высокой температуры и загрязнения поверхности наблюдались нагрев фотоэлектрического модуля и снижение его выходной мощности. В условиях открытого пространства температура поверхности загрязнённого модуля находилась в пределах 50,1-60,8 °С. При переменной облачности его выходная мощность составляла 111,7-121,15 Вт. Полученные результаты показывают, что фактические характеристики модуля зависят от сочетания температурных условий, интенсивности солнечного излучения и степени загрязнения поверхности.

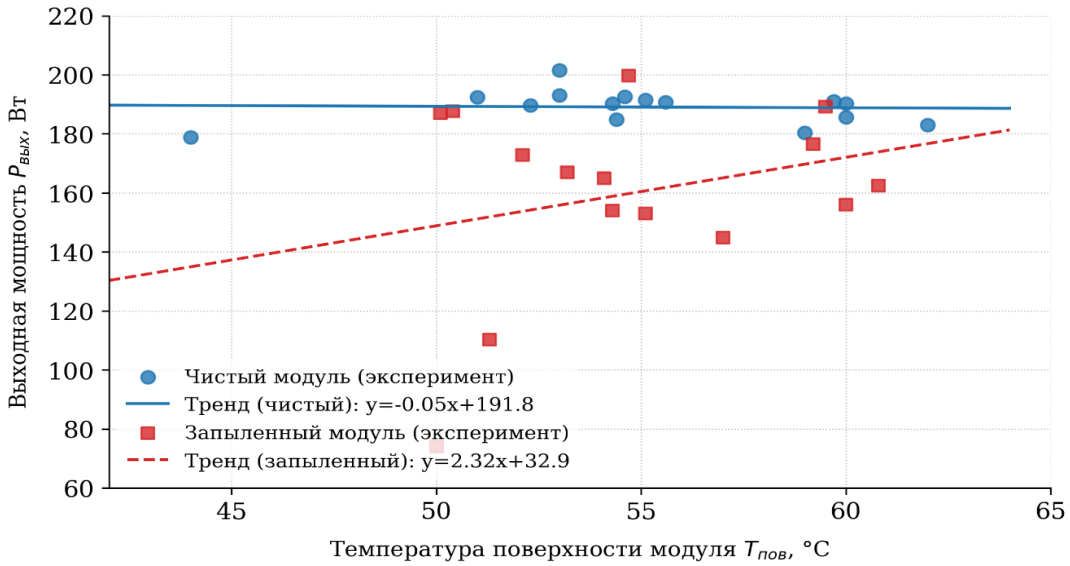


Рисунок 5. – Экспериментальные зависимости и линейные тренды выходной мощности очищенного и загрязнённого пылью ФЭМ от температуры их поверхности

Полевые исследования показали, что использование номинальных характеристик фотоэлектрических модулей (ФЭМ), полученных в стандартных условиях испытаний (STC), без учёта реальных условий эксплуатации может приводить к завышению расчётной выработки электроэнергии в жарком климате.

При нагреве фотоэлектрических модулей снижается их рабочее напряжение, что при относительно небольшом изменении силы тока приводит к уменьшению выходной мощности. В результате фактические энергетические показатели могут отличаться от

расчётных значений, определённых по номинальным характеристикам. Это подтверждает необходимость учитывать рабочую температуру модулей и степень загрязнения их поверхности при моделировании и проектировании солнечных электростанций.

Для уменьшения тепловой нагрузки на фотоэлектрические модули могут применяться естественная вентиляция, рациональное размещение оборудования и конструктивные решения, обеспечивающие отвод тепла. Дополнительными мерами являются использование защитных покрытий, регулярная очистка поверхности и применение специальных голографических плёнок, эффективность которых требует экспериментальной оценки в конкретных условиях эксплуатации.

Для количественной оценки выявленных закономерностей проведено компьютерное моделирование в PVsyst и MATLAB/Simulink.

В третьей главе «*Моделирование рабочих режимов и выбор электрического оборудования фотоэлектрической электростанции в программном комплексе PVsyst с учётом температурных факторов*» «в программном комплексе PVsyst выполнено моделирование режимов работы фотоэлектрической электростанции и обоснован выбор её электрического оборудования с учётом температурного воздействия». Основной целью моделирования являлись определение необходимой мощности автономной фотоэлектрической системы, оценка влияния климатических условий и температуры на производство электрической энергии, анализ энергетических потерь и определение показателей эффективности автономной системы.

Моделирование выполнено для площадки, расположенной в Кушониёнском районе. Географические координаты площадки составляют 37,872° северной широты и 68,724° восточной долготы, высота над уровнем моря 419 м. Для моделирования выбрана ориентация фотоэлектрических модулей на юг с азимутом 0° и углом наклона 45°. Расчёты показали, что годовая солнечная радиация на наклонной поверхности составляет 1946 кВт·ч/м^2, что на 11,86 % выше, чем на горизонтальной поверхности. Полученный результат подтверждает обоснованность выбора угла наклона фотоэлектрических модулей для исследуемых условий. Для организации последовательного процесса имитационного моделирования автономной фотоэлектрической системы разработан алгоритм, представленный на рисунке 6. В начале моделирования задаются географические координаты объекта и параметры электрической нагрузки. Затем определяются ориентация и конфигурация фотоэлектрической установки, а также основные характеристики силового оборудования. На основе введённых данных формируются исходные условия для последующего моделирования работы системы.

Для определения требуемой мощности автономной фотоэлектрической системы выполнен расчёт электрической нагрузки с учётом количества электроприёмников, их номинальной мощности и продолжительности работы, заданных в программном комплексе. В результате расчётная пиковая нагрузка объекта принята равной 7 кВт, а среднее суточное потребление электроэнергии составляет 10,483 кВт·ч. Эти показатели использованы в качестве исходных данных для последующего расчёта параметров автономной фотоэлектрической системы. С учётом полученной нагрузки сформирована фотоэлектрическая система мощностью 13,50 кВт, в состав которой входят 45 модулей SOLARMODUL ALEO S19 по 300 Вт.

Для аккумулирования вырабатываемой энергии предусмотрено 19 литий-ионных аккумуляторов емкостью 65,6 А·ч каждый. Общая емкость аккумуляторной батареи составляет 1246,4 А·ч при напряжении системы 48 В. В качестве резервного источника электроснабжения предусмотрен генератор мощностью 3 кВт. Одним из важных результатов моделирования является определение влияния температуры окружающей среды на электрические параметры фотоэлектрических модулей. В программном комплексе PVsyst построены и проанализированы вольт-амперные характеристики модулей при температурах 25 и 55 °C. Суточное изменение нагрузки потребителей приведено на рисунке 7.

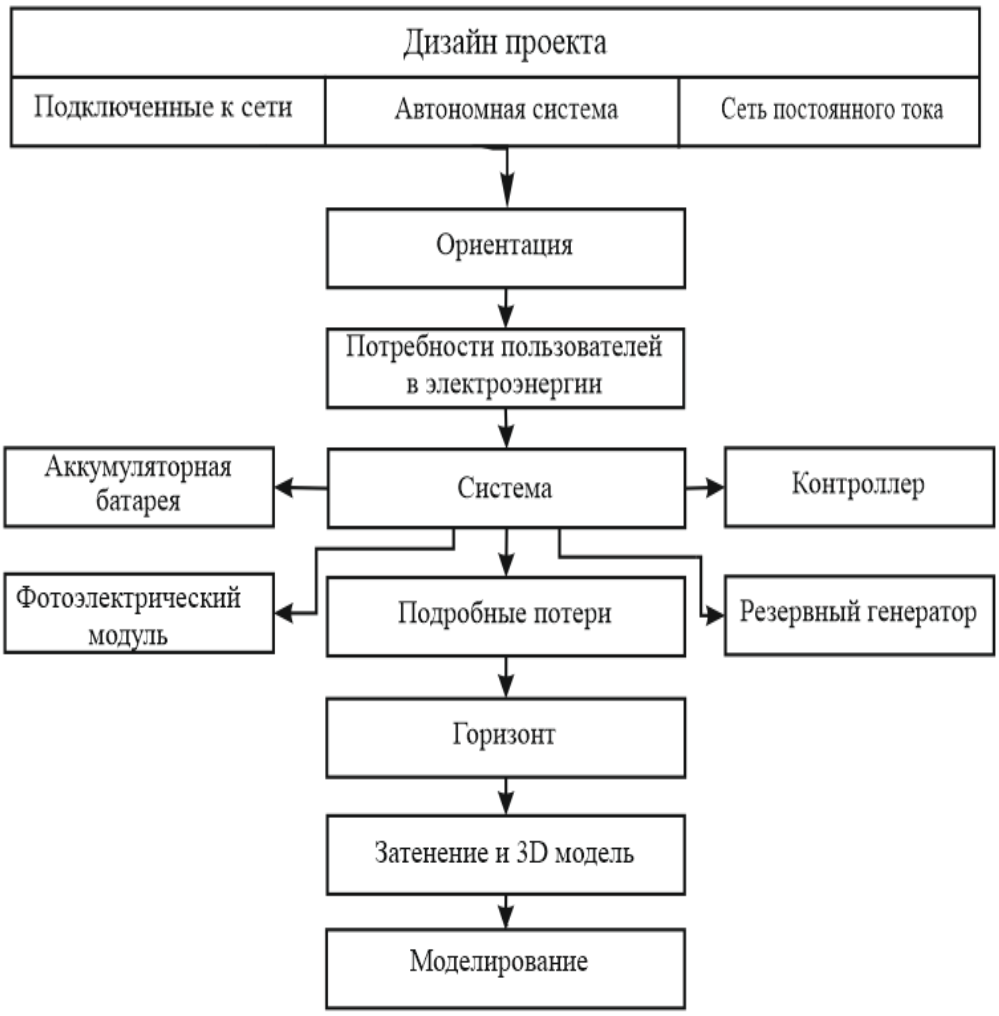


Рисунок 6. – Алгоритм моделирования автономной фотоэлектрической системы в программном комплексе PVsyst

По данным моделирования (рисунок 8), нагрев ФЭМ с 25 до 55 °С снижает его максимальную мощность с 300 до 248,7 Вт, то есть на 51,3 Вт (17,1%). При этом U_{OC} заметно уменьшается, а изменение *Isc* остается незначительным.

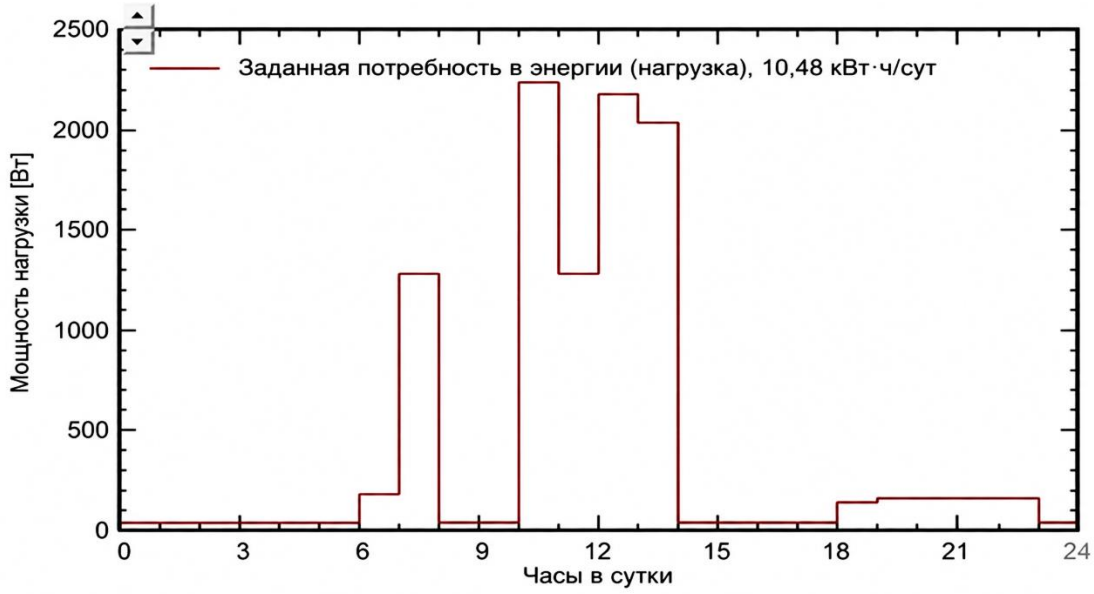
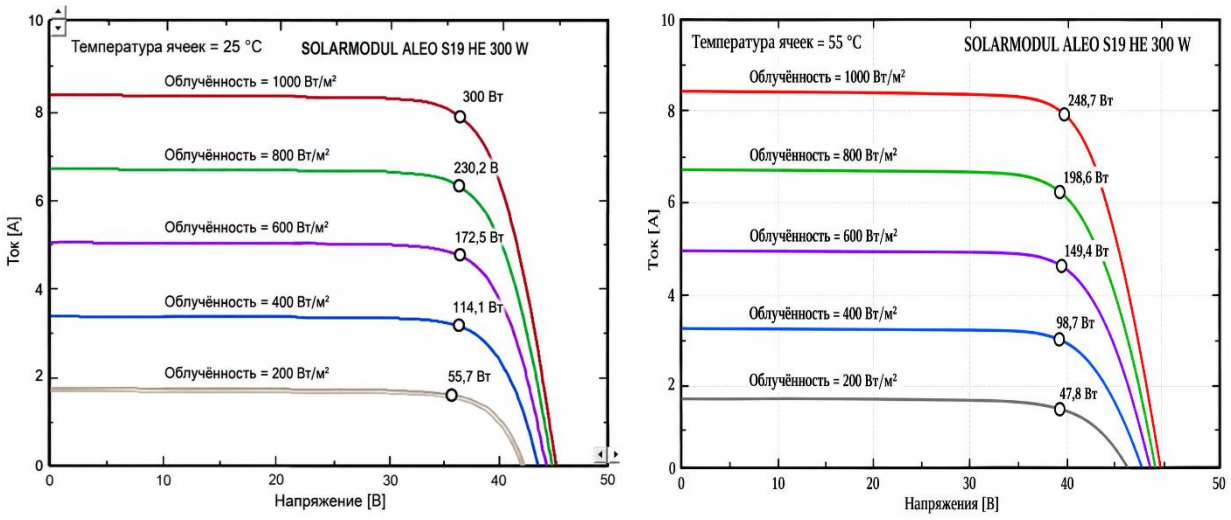


Рисунок 7. – Суточный график электрической нагрузки потребителей автономной фотоэлектрической системы

Полученные результаты показывают, что температурное воздействие является одним из основных факторов снижения фактической выходной мощности фотоэлектрических модулей в условиях жаркого климата.



а) б)

Рисунок 8. – Сравнительный анализ расчётных вольт-амперных характеристик (ВАХ) ФЭМ при рабочих температурах 25 ºС (а) и 55 ºС (б)

Для учёта влияния окружающих объектов на поступление солнечной радиации в программном комплексе PVsyst разработана трехмерная модель размещения фотоэлектрических модулей (рисунок 9). В модели учитываются движение Солнца и зоны возможного затенения, создаваемые неподвижными объектами, что позволяет оценить их влияние на поступление солнечной радиации. Использование трехмерной модели позволяет оценить потери от затенения, создаваемого окружающими объектами, и выбрать оптимальный вариант размещения ФЭМ.

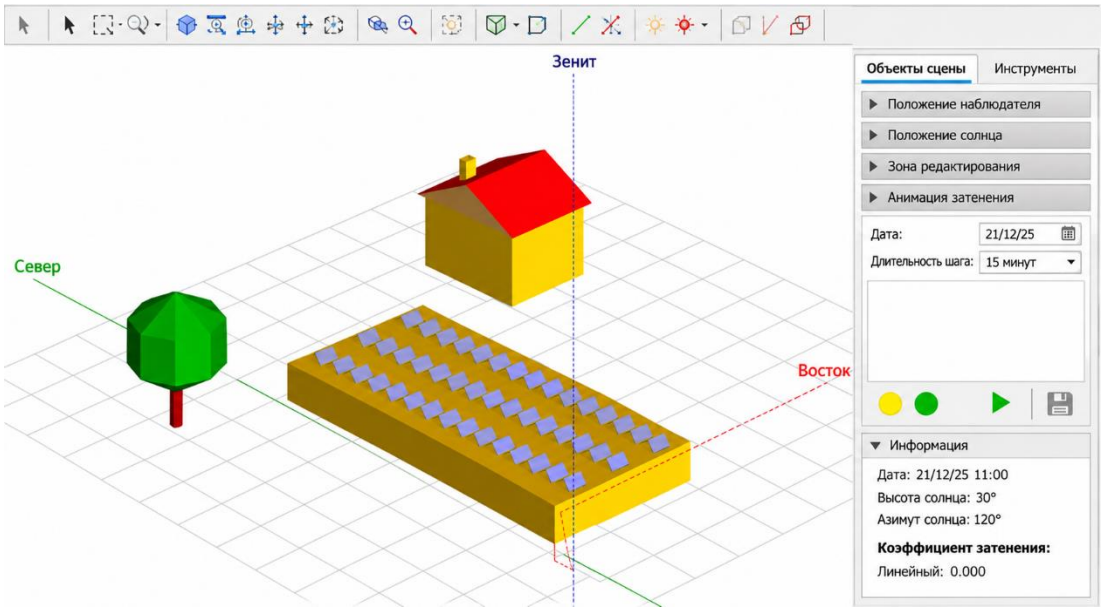


Рисунок 9. – Трёхмерная модель фотоэлектрической системы и влияние затенения окружающих объектов

Результаты энергетических расчетов в программном комплексе PVsyst показали, что эффективная солнечная радиация на поверхности фотоэлектрического массива составляет 1756 кВт·ч/м^2. «По результатам моделирования годовая выработка фотоэлектрической системы в условиях STC составила 24180 кВт·ч, а её общий КПД 14,78%».

«При анализе энергетического баланса установлено, что 4,0% энергии теряется из-за повышения температуры, 0,75% вследствие деградации модулей, 2,6% приходится на потери в соединениях и 5,13% на омические потери в цепях постоянного тока».

С учётом основных потерь фактическая выработка электрической энергии фотоэлектрической системой составила 4071 кВт·ч/год. В результате последующего моделирования автономной фотоэлектрической системы (рисунок 10) с учётом работы инвертора, аккумуляторных батарей и других элементов системы количество электрической энергии, доступной для передачи потребителю, составило 3612 кВт·ч/год.

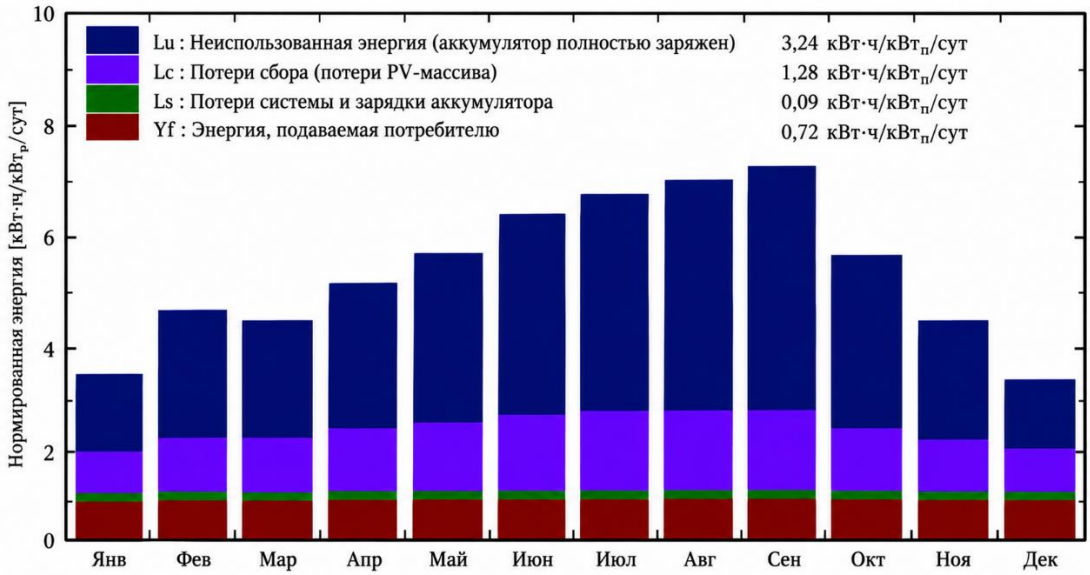


Рисунок 10. – Энергетический баланс и структура потерь фотоэлектрической системы

Среднее значение удельной конечной выработки электрической энергии (Y_f) составило 0,72 кВт·ч/кВт·сут. При полной зарядке аккумуляторных батарей 3,24 кВт·ч/(кВт·сут). Потери в фотоэлектрическом массиве составили (Lc) достигли 1,28 кВт·ч/(кВт·сут), а суммарные системные потери и потери при зарядке аккумуляторов (Ls) 0,09 кВт·ч/(кВт·сут). Оценка интегральных показателей работы фотоэлектрической системы (рисунок 11) показала, что коэффициент производительности (PR) составляет 0,165, или 16,5%, а доля солнечной энергии в покрытии электрической нагрузки (SF) 0,985, или 98,5%. Значение SF показывает, что 98,5% годовой потребности потребителя в электрической энергии обеспечивается за счет солнечной энергии.

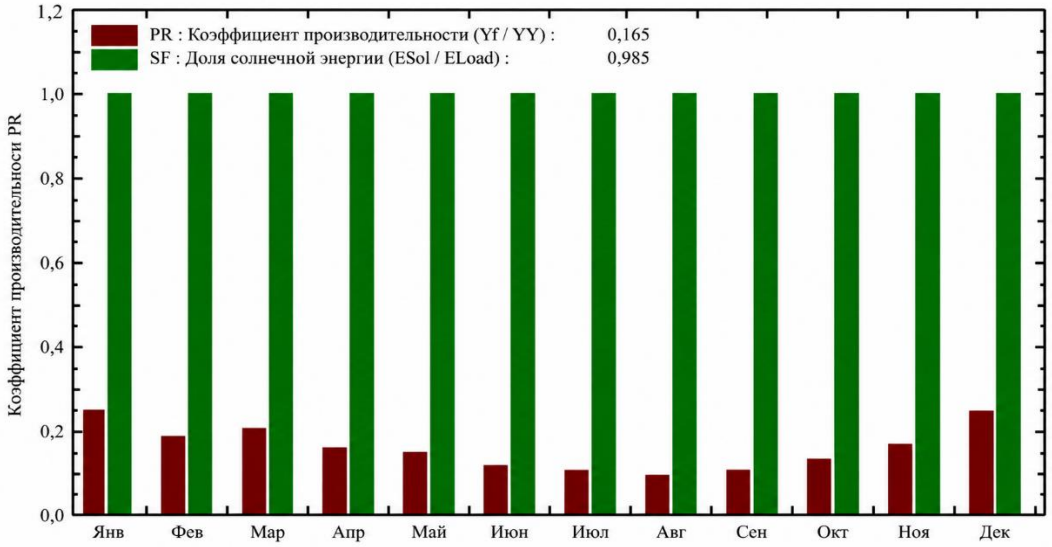


Рисунок 11. – Интегральные показатели PR и SF фотоэлектрической системы

При этом значение PR отражает совокупное влияние климатических температурных факторов, технических характеристик, а также внутренних потерь системы. Таким образом, моделирование фотоэлектрической системы в программном комплексе PVsyst позволило определить и обосновать основные параметры системы для условий Кушониёнского района. Полученные результаты показали, что для оценки фактического производства электрической энергии недостаточно использовать только номинальные параметры фотоэлектрических модулей, определенные в стандартных условиях испытаний (STC).

При проведении энергетических расчётов необходимо учитывать влияние температуры, солнечной радиации, затенения и энергетических потерь в элементах системы. Выполненное моделирование создало расчётную основу для обоснованного выбора установленной мощности фотоэлектрической системы и электрического оборудования, а также оценки энергетических показателей автономной фотоэлектрической системы.

В четвертой главе «Исследование рабочих режимов фотоэлектрических установок на основе моделирования тепловых процессов» разработана методика расчёта электрических параметров фотоэлектрических модулей с учётом применения термозащиты. Для расчётов использован фотоэлектрический модуль SOLARMODUL ALEO S19 номинальной мощностью 300 Вт. На основе математического моделирования исследованы его электрические характеристики при различных температурных режимах и определена эффективность предложенной термозащиты. По результатам расчётов построены вольт-амперные характеристики и зависимости выходной мощности модуля от температуры.

Чтобы оценить, как изменение температуры отражается на работе ФЭМ, были определены его основные электрические параметры, такие как рабочая температура ФЭМ, ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, максимальная выходная мощность и коэффициент заполнения, вольт-амперной характеристики. При выполнении расчётов изменение тока КЗ под действием температуры не учитывалось, поскольку его температурная зависимость значительно слабее температурного изменения напряжения.

Расчётный ток КЗ в зависимости от плотности мощности солнечной радиации определяется по следующему уравнению:

$$I_{PK} = I_{SC} \cdot \frac{E}{E_{STC}}, \quad A \tag{6}$$

где: $I_{КЗ}$ – ток КЗ ФЭМ, А; I_{STC} – ток КЗ ФЭМ в «стандартных условиях испытаний (STC), который для исследуемого модуля составляет 9,97 А; E – плотность солнечной радиации, Вт/м²; E_{STC} – плотность мощности солнечной радиации в стандартных условиях испытаний (STC), равная 1000 Вт/м²».

«Рабочая температура СЭ с учётом температуры окружающей среды и плотности мощности солнечной радиации рассчитывается по следующему уравнению:

$$T_{СЭ.} = T_{окр.ср.} + E \cdot \left(\frac{T_{NOCT} - 20}{800} \right), \quad ^{O}C \tag{7}$$

где: $T_{СЭ}$ – расчётная рабочая температура СЭ, ºС; $T_{окр.ср}$ – температура окружающей среды, ˚С; 20 ºС и 800 Вт/м^2 параметрами условий определения NOCT». Для учёта влияния термозащиты на изменение напряжения холостого хода *Uoc* использовано следующее уравнение:

$$U_{XX} = U_{OC,STC} + K_U \cdot Z_{TЗМ} \, (T_{СЭ} - 25), \quad B \tag{8}$$

где: U_{XX} – расчётное напряжение холостого хода ФЭМ, В; $U_{OC,STC}$ – напряжения холостого хода ФЭМ в стандартных условиях испытаний (*STC*), В; K_U = –0,29 %/ºС или – 0,114 В/ºС – температурный коэффициент напряжения модуля; $Z_{TЗМ}$ – коэффициент термозащиты модуля, ˚С; $T_{СЭ}$ – расчётная рабочая температура ФЭМ, ºС. При $Z_{TЗМ}$ = 1 принимается

стандартная температурная зависимость напряжения, а при $0 < Z_{ТЗМ} < 1$ учитывается снижение температурного воздействия в результате применения термозащиты.

Максимальная выходная мощность модуля с учётом тока короткого замыкания $I_{КЗ}$, напряжения холостого хода U_{XX} и коэффициента заполнения определяется по следующему уравнению:

$$P_{макс} = I_{КЗ} \cdot U_{XX} \cdot F_{ММ}, \quad Вт \tag{9}$$

где: $F_{ММ}$ – коэффициент заполнения ФЭМ. В рамках принятой модели $F_{ММ}$ считается постоянным и не зависит от температуры фотоэлектрического элемента и плотности мощности солнечной радиации. Для определения коэффициента заполнения модуля в номинальных условиях использовано уравнение (10):

$$F_{ММ} = \frac{P_{макс}}{U_{XX} \cdot I_{КЗ}} \tag{10}$$

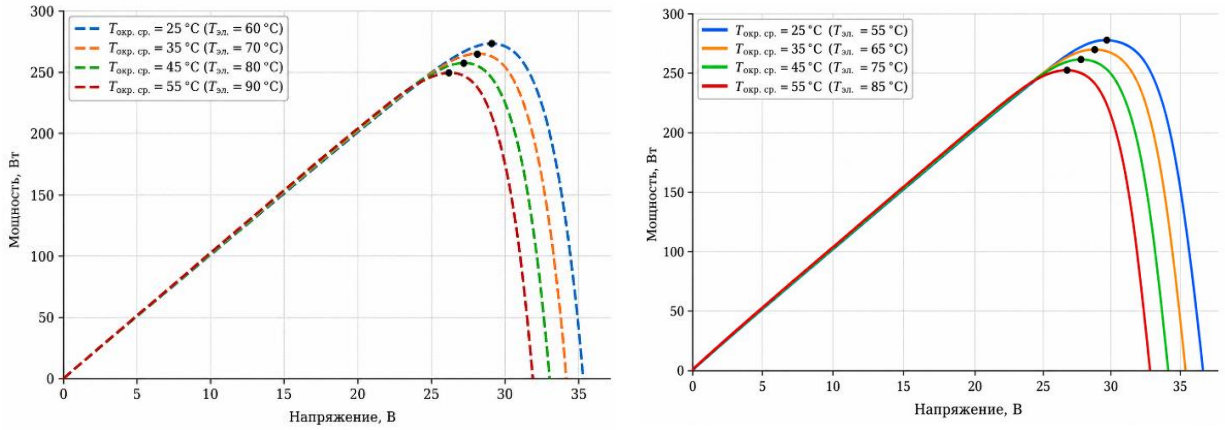
Здесь $P_{макс}$ – номинальная максимальная выходная мощность фотоэлектрического модуля, указанная производителем для стандартных условий испытаний (*STC*), плотность мощности солнечной радиации 1000 Вт/м^2, температура фотоэлектрического элемента 25 ^{o}C, спектрального распределения АМ 1,5. Результаты расчёта основных электрических параметров ФЭМ, полученные по формулам (6)-(10) при различных температурах окружающей среды с учётом влияния термозащиты, представлены в таблице 5.

Таблица 5. – Расчётные электрические характеристики ФЭМ SOLARMODUL ALEO S19 с учётом влияния термозащиты

Условия	Температура окружающей среды, ($T_{окр.ср.}$, °C)	Рабочая температура ФЭЭ без ТЗМ, ($T_{СЭ}$, °C)	Рабочая температура ФЭЭ с ТЗМ, ($T_{СЭ}$, °C)	Ток короткого замыкания, (I_{sc}, *A*)	Напряжение холостого хода без ТЗМ, (U_{oc}, *B*)	Напряжение холостого хода с ТЗМ, (U_{oc}, *B*)	Максимальная выходная мощность без ТЗМ, (P_{max}, *Вт*)	Максимальная выходная мощность с ТЗМ, (P_{max}, *Вт*)
Условия (STC)	-	25	25	9,97	39,4	39,4	300	300
Расчётные режими	25	60,0	55,0	9,92	35,31	35,88	274,0	278,01
	35	70,0	65,0	9,97	34,17	34,74	266,58	270,5
	45	80,0	75,0	10,02	33,03	33,60	259,0	262,91
	55	90,0	85,0	10,07	31,89	32,46	251,39	255,23

По данным таблицы 5, нагрев фотоэлектрического элемента приводит к снижению напряжения холостого хода и максимальной мощности модуля. При температуре окружающей среды 45 ^{o}C мощность модуля без ТМЗ составляет 259,0 Вт, а при её использовании 262,91 Вт. Это показывает, что ТЗМ снижает рабочую температуру элемента и позволяет сохранить более высокие значения напряжения и выходной мощности.

Результаты расчётов и сравнительный анализ характеристик выходной мощности ФЭМ представлены на рисунке 12.



а) б)

Рисунок 12. – «Характеристики выходной мощности фотоэлектрического модуля SOLARMODUL ALEO S19: а) без применения термозащиты и б) с применением термозащиты при различных температурах окружающей среды»

Для определения влияния предложенной ТЗМ на электрические характеристики ФЭМ разработана стуруктурная схема расчёта основних параметров (рисунок 13). Схема отражает влияние коэффициента термозащиты на рабочую температуру ФЭЭ и последующее использование полученного значения температуры для определения тока *Isc*, напряжения *Uoc* и расчётной максимальной выходной мошности модуля.

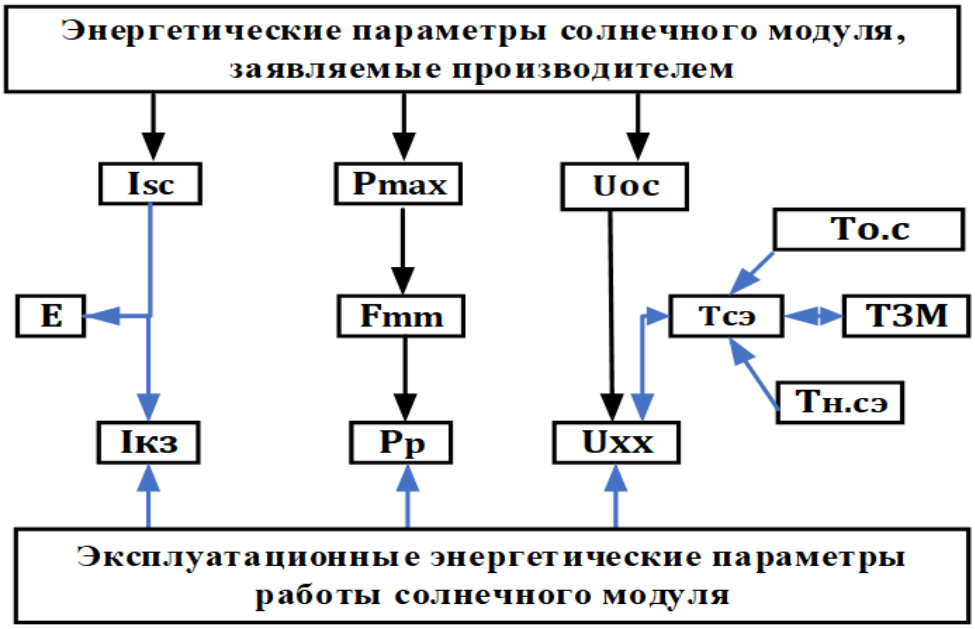
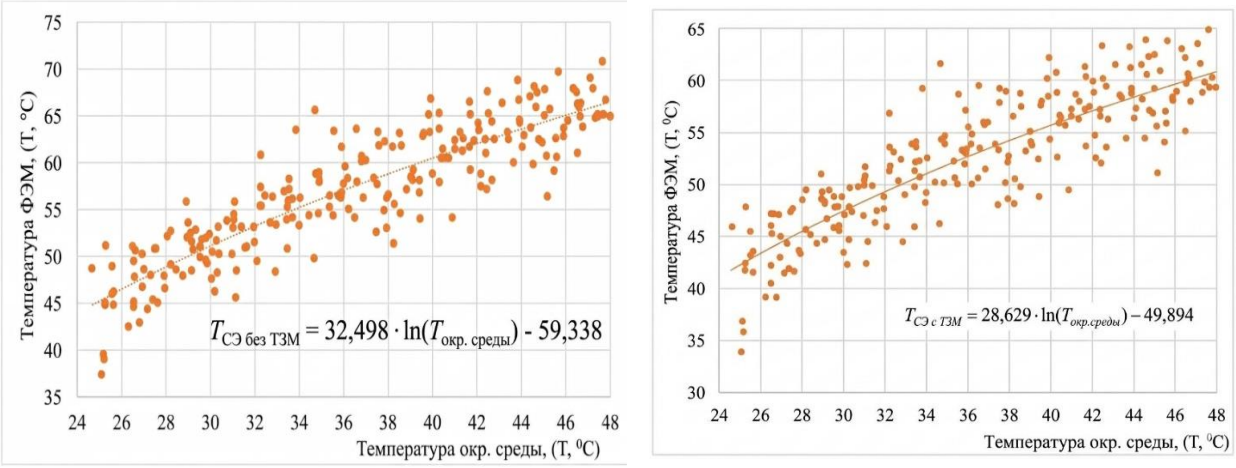


Рисунок 13. – «Структурная схема определения электрических характеристик фотоэлектрического модуля в условиях эксплуатации с учётом термозащиты»

Для сопоставления расчётных и экспериментальных данных исследована температура поверхности фотоэлектрических модулей при различных значениях температуры окружающей среды и солнечной радиации. Обработка результатов регрессионным методом и методом наименьших квадратов позволила получить зависимость разности температур модулей с термозащитой и без неё от температуры окружающей среды (рисунок 14). «Результаты экспериментальных исследований показали, что при температуре окружающей среды 45 °C рабочая температура модуля без термозащиты составляет 62,13 °C, тогда как при применении термозащиты она снижается до 58,6 °C». Таким образом, использование предложенной термозащиты позволяет снизить рабочую температуру модуля на 3,53 °C, или примерно на 5,7%. Полученный результат

подтверждает эффективность предложенной термозащиты в снижении температурной нагрузки на фотоэлектрический модуль.



а) б)

Рисунок 14. – «Регрессионные модели зависимости разности температур между поверхностями ФЭМ: а) с термозащитой и б) без неё от температуры окружающей среды»

Для проверки соответствия экспериментальных данных расчётным и оценки эффективности термозащиты в MATLAB/Simulink разработана математическая модель фотоэлектрической установки (рисунок 15). Она учитывает влияние температуры. С помощью модели сравниваются два режима работы: без термозащиты и с её применением при одинаковых условиях эксплуатации.

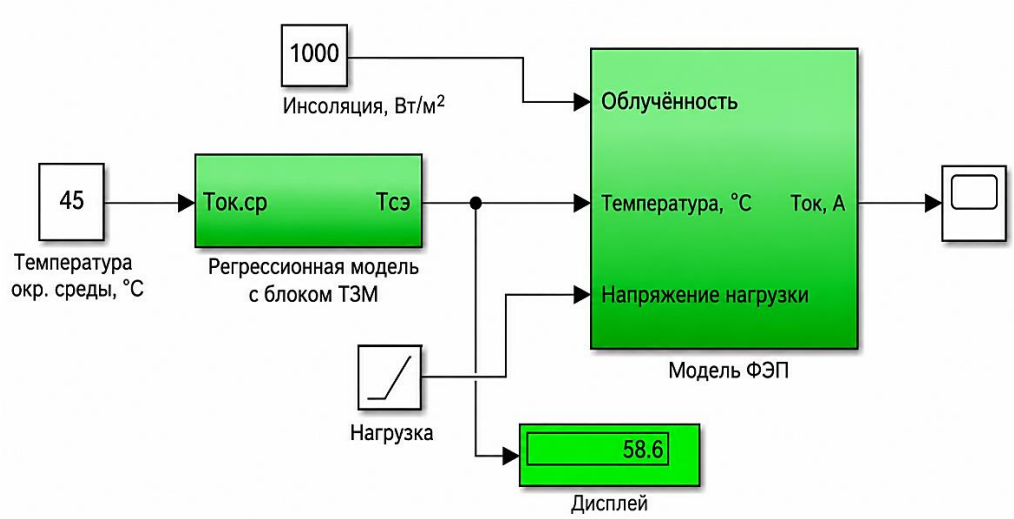


Рисунок 15. – «Модель фотоэлектрической установки в среде MATLAB/Simulink с использованием блока термозащиты модуля»

«Для оценки влияния предложенной термозащиты на электрические параметры фотоэлектрического модуля в среде MATLAB/Simulink разработана и реализована структура блока термозащиты модуля (ТЗМ)». Данный блок использован для моделирования изменения рабочей температуры фотоэлектрического элемента и расчёта основных электрических параметров модуля (рисунок 16). При температуре окружающей среды 45°C моделирование показало, что применение термозащиты снижает рабочую температуру фотоэлектрического элемента и уменьшает потери мощности. При этом повышаются напряжение холостого хода и напряжение в точке максимальной мощности, что способствует увеличению максимальной выходной мощности модуля по сравнению с режимом без термозащиты.

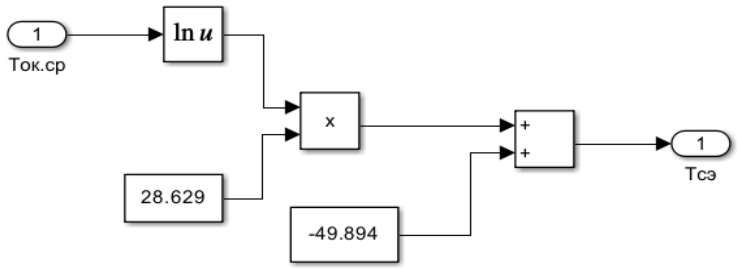
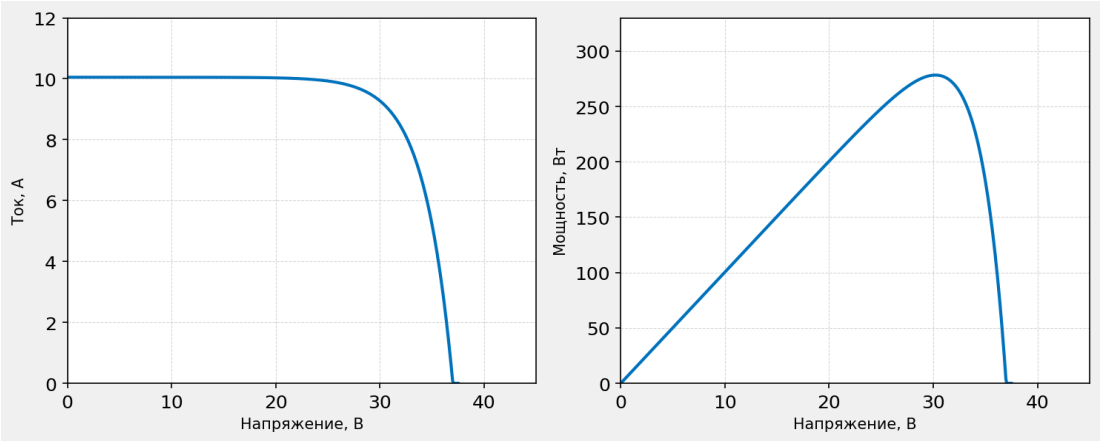
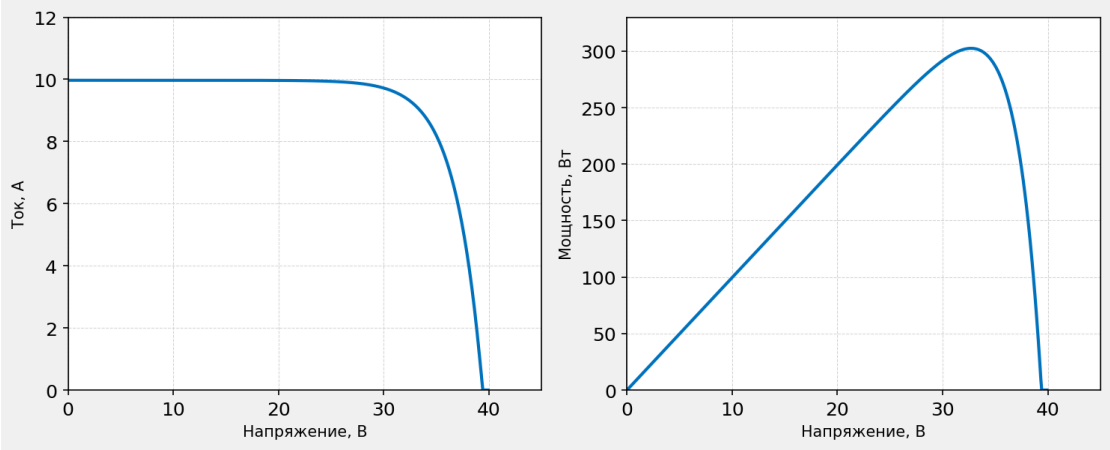


Рисунок 16. – Структура блока термозащиты модуля в среде MATLAB/Simulink

Полученные вольт-амперные характеристики и зависимости выходной мощности представлены на рисунке 17.



а)



б)

Рисунок 17. – «Вольт-амперные (I-V) и мощностные (P-V) характеристики ФЭМ при температуре окружающей среды 45 ºС: а) без термозащиты; б) с термозащитой»

На основе теоретических расчётов, натурных экспериментов и компьютерного моделирования разработана методика расчёта электрических характеристик фотоэлектрических модулей (ФЭМ) с учётом температурного воздействия и применения термозащиты (ТЗМ). Методика позволяет определять рабочую температуру фотоэлектрического элемента (ФЭЭ), ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, коэффициент заполнения и максимальную выходную мощность при различных условиях эксплуатации. Полученные результаты показали, что применение термозащиты снижает рабочую температуру модуля и температурные потери мощности, способствуя сохранению его электрических характеристик.

Разработанная модель в среде MATLAB/Simulink использована для сопоставления режимов работы модуля и количественной оценки влияния температуры на его электрические параметры. Полученные результаты создают расчётную основу для анализа работы фотоэлектрических установок при высоких температурах окружающей среды, в том числе в климатических условиях Республики Таджикистана.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Изучение результатов существующих исследований и анализ факторов, влияющих на работу фотоэлектрических электростанций, показали, что температурный режим модулей играет важную роль в формировании энергетических показателей системы. Повышение рабочей температуры приводит к изменению основных электрических параметров, прежде всего к «снижению напряжения холостого хода и максимальной выходной мощности. В связи с этим учёт температурного воздействия необходим при оценке и моделировании производства электрической энергии» [4-А, 5-А, 6-А, 8-А, 14-А, 16-А].

2. «Теоретически и экспериментально установлены закономерности влияния температуры на электрические и энергетические параметры фотоэлектрических модулей». Установлено, что нагрев фотоэлектрического элемента приводит к уменьшению напряжения холостого хода и максимальной выходной мощности, при этом ток короткого замыкания изменяется незначительно. Для исследуемого модуля температурный коэффициент мощности равен примерно -40 %/К, что указывает на заметное снижение его мощности при повышении температуры [8-А, 16-А].

3. «В программном комплексе PVsyst разработана модель автономной фотоэлектрической системы для условий Кушониёнского района Республики Таджикистан с учётом климатических параметров, температурных факторов, электрической нагрузки и технических характеристик системы. Для наклонной поверхности с углом наклона 45^{o} и азимутом 0^{o} годовое поступление солнечной радиации составило 1946 кВт·ч/м^{2}, что на 11,86 % больше, чем на горизонтальной поверхности» [1-А, 4-А, 6-А].

4. Обоснована техническая конфигурация автономной фотоэлектрической системы. Для установленной электрической нагрузки 7 кВт, максимальной нагрузки 6573 Вт и среднесуточного потребления электроэнергии 10,483 кВт·ч/сут, выбраны ёмкость аккумуляторной батареи фотоэлектрической системы 65,6 А·ч и номинальным напряжением 48 В, а также резервный генератор мощностью 3 кВт [1-А, 4-А, 6-А].

5. Количественно оценено влияние температуры на энергетический баланс фотоэлектрической системы. При повышении температуры окружающей среды с 25 до 55 ^{o}С с учётом соответствующего повышения рабочей температуры фотоэлектрического элемента максимальная мощность модуля номинальной мощностью 300 Вт снизилась до 248,7 Вт, то есть примерно на 17,1 %. В годовом энергетическом балансе расчётная энергия автономной системы составила 24180 кВт·ч/год, общий КПД 14,8 %, коэффициент производительности системы (PR) 16,5 %, а доля солнечной энергии в покрытии электрической нагрузки (SF) 98,5 % [4-А, 6-А, 8-А, 17-А].

6. Разработана методика расчёта электрических параметров фотоэлектрического модуля с учётом влияния термозащиты. Данный подход позволяет определить рабочую температуру ФЭЭ, ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, коэффициент заполнения и максимальную выходную мощность модуля. В расчётную модель введён блок термозащиты (ТЗМ), позволяющий количественно учитывать влияние термозащиты на рабочую температуру фотоэлектрического элемента [8-А, 17-А].

7. По результатам экспериментальных исследований количественно установлены закономерности изменения температуры поверхности фотоэлектрических модулей в зависимости от температуры окружающей среды для двух режимов эксплуатации с термозащитой и без неё. На основе полученных экспериментальных данных определены регрессионные уравнения для обоих режимов, а также установлена зависимость снижения

температуры модуля от температуры окружающей среды. Для определения параметров данной зависимости применён метод наименьших квадратов. Полученная регрессионная модель интегрирована в имитационную модель в среде MATLAB/Simulink [8-А].

8. Разработана математическая модель работы фотоэлектрического модуля в среде MATLAB/Simulink, использованная для сопоставления двух режимов эксплуатации. При температуре окружающей среды 45 ºС рабочая температура модуля без термозащиты составила 62,13 ºС, а при применении предложенной термозащиты 58,6 ºС. Таким образом, использование термозащиты позволило снизить рабочую температуру на 3,53 ºС, или примерно на 5,7 %, по сравнению с режимом без её применения [5-А, 8-А].

Рекомендации по практическому применению результатов исследования

− При проектировании автономных и сетевых фотоэлектрических электростанций, а также при выборе фотоэлектрических модулей и расчётного оборудования для объектов в климатических условиях Республики Таджикистан рекомендуется учитывать влияние рабочей температуры модулей на их электрические и энергетические параметры. Предложенную методику целесообразно применять при расчёте установленной мощности фотоэлектрической системы, оценке годового производства электрической энергии и определении температурных потерь мощности.

− Разработанную модель в среде MATLAB/Simulink и полученные экспериментальные и регрессионные зависимости рекомендуется использовать в научных исследованиях, проектных расчётах и учебном процессе для анализа температурного воздействия на электрических параметров и сравнения точности прогнозирования производства электрической энергии в условиях жаркого климата Республики Таджикистан и других регионов с аналогичными климатическими условиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безруких П.П. Состояние, перспективы и проблемы развития возобновляемых источников энергии / П.П. Безруких, Д.С. Стребков // Малая энергетика. – 2005. – № 1-2. – С. 6-12.

2. Стребков Д.С. Роль солнечной энергии в энергетике будущего / Д.С. Стребков // Теплоэнергетика. – 2006. – № 3. – С. 58-64.

3. Елистратов, В.В. Моделирование работы и оптимизация параметров систем автономного электроснабжения на основе ВИЭ / В.В. Елистратов, Е.С. Аронова // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – № 1. – С. 119-127.

4. Duffie John A., William A. Beckman, and Nathan Blair. Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind. John Wiley & Sons, 2020. DOI:10.1002/9781119540328

5. Ang T.-Z., Salem M., Kamarol M., Das H. S., Nazari M. A., Prabaharan N. et al. A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions // Energy Strategy Reviews. 2022.Vol. 43. Art. 100939. DOI: 10.1016/j.esr.2022.100939.

6. Holechek J.L., Geli H.M.E., Sawalhah M.N., Valdez R.A. A global assessment: Can renewable energy replace fossil fuels by 2050? // Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 8. Art. 4792. DOI: 10.3390/su14084792.

7. Faiman D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2008. Vol. 16, No. 4. P. 307–315.DOI: 10.1002/pip.813.

8. Skoplaki E., Palyvos J. A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations // Renewable Energy. 2009. Vol. 34, No. 1. P. 23–29. DOI: 10.1016/j.renene.2008.04.009.

9. Skoplaki E., Palyvos J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations // Solar Energy. 2009. Vol. 83, No. 5. P. 614–624. DOI: 10.1016/j.solener.2008.10.008.

10. Воротынцев Д.В., Тягунов М.Г. Прогноз выработки электроэнергии фотоэлектрическими электростанциями (на сутки вперед) с использованием машинного обучения // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 53–57. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-53-57.

11. Энгель Е. А., Энгель Н. Е. Методы машинного обучения для задач прогнозирования и максимизации выработки электроэнергии солнечной электростанции // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 223. № 2. С. 146–170. DOI: 10.17308/sait/1995-5499/2023/2/146-170.

12. Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 6. С. 38–51.

13. Tsanakas I. A., Lokhat I., Jay A., Gregoire C., Rusnak J. State-of-Play and Emerging Challenges in Photovoltaic Energy Yield Simulations: A Multi-Case Multi-Model Benchmarking Study // Solar RRL. 2023. Vol. 7, No. 8. Art. 2200582. DOI: 10.1002/solr.202200582.

14. Adekanbi M. L., Alaba E. S., John T. J., Tundealao T. D., Banji T. I. Soiling Loss in Solar Systems: A Review of Its Effect on Solar Energy Efficiency and Mitigation Techniques // Cleaner Energy Systems. 2024. Vol. 7. Art. 100094. DOI: 10.1016/j.cles.2023.100094.

15. Norde Santos F., Wilbert S., Ruiz Donoso E., El Dik J., Campos Guzman L., Hanrieder N., Fernández García A., Alonso García C., Polo J., Forstinger A., Affolter R., Pitz-Paal R. Cleaning of Photovoltaic Modules through Rain: Experimental Study and Modeling Approaches // Solar RRL. 2024. Vol. 8, No. 24. Art. 2400551. DOI: 10.1002/solr.202400551.

16. Bahaidarah H., Subhan A., Gandhidasan P., Rehman S. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions // Energy. 2013. Vol. 59. P. 445–453. DOI: 10.1016/j.energy.2013.07.050.

17. Chow T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology // Applied Energy. 2010. Vol. 87, no. 2. P. 365–379. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.06.037.

18. Кирпичникова И.М. Сравнительный анализ генерации электрической энергии фотоэлектрическими модулями в различных температурных условиях / И.М. Кирпичникова, Д.А. Эвок, И.Б. Махсумов // Электричество. 2023. № 11. С. 34-41. DOI 10.24160/0013-5380-2023-11-34-41.

19. Щеклеин С.Е., Немихин Ю.Е., Велькин В.И., Власов В.В., Коржавин С.А., Серкова Е.В. Исследование эффективности солнечных фотоэлектрических преобразователей в натурных условиях // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 3. С. 55–58.

20. Shcheklein S.E., Matveev A.V., Beloborodov I.A., Nemikhin Y.E., Vlasov V.V. Study of Photovoltaic Grid-Connected Station Efficiency in the Annual Cycle // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). 2016. № 11–12. P. 37–51. DOI: 10.15518/isjaee.2016.11-12.037-051.

21. Солнечные фотоэлектрические станции: монография / Р.А. Амерханов, О.В. Григораш, И.Б. Самородов [и др.]. Краснодар: КубГАУ, 2017. 206 с.

22. Renewable Capacity Statistics 2026. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency (IRENA), 2026. 68 p. ISBN 978-92-9260-725-8.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, признанных Высшей аттестационной комиссией при Президенте Республики Таджикистан и Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации:

[1-А]. **Давлатзода А.Н.** Методика расчёта мощности солнечной системы автономного типа на примере электроснабжения частного дома [Текст] / И.Б. Махсумов, Н.Х. Одинаев, **А.Н. Давлатзода,** К.Ш. Шокиров // Журнал «Окружающая среда и энерговедение» (ОСЭ). – 2024. – № 2(22). – С. 79-97.

[2-А]. **Давлатзода А.Н.** Распределенная генерация и её влияние на режим работы электрической сети [Текст] / Д.Т. Исозода, И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода** // Научный журнал «Водные ресурсы, энергетика и экология» Института водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана № 4(3). – Душанбе, 2024 г. – С. 110-117. – ISSN 2789-0953.

[3-А]. **Давлатзода А.Н.** Анализ производительности автономных солнечных электростанций с учётом экологических аспектов с применением программного пакета PVsyst в условиях южных регионов Республики Таджикистан [Текст] / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** М.Б. Холназаров // Журнал «Окружающая среда и энерговедение» (ОСЭ). – 2025. – № 1(25). – С. 106-128. – DOI: 10.24412/2658-6703-2025-1-106-128. ISSN 2658-6703.

[4-А]. **Давлатзода А.Н.** Влияние изменчивости солнечной инсоляции на эффективность фотоэлектрических систем в условиях юга Таджикистана [Текст] / И.Б. Махсумов, Д.Т. Исозода, **А.Н. Давлатзода** // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 3(71). – С. 5-13. – ISSN 2520-2227.

[5-А]. **Davlatzoda A.N.** Performance Analysis of Autonomous Solar Power Plants Using the PVsyst Software Package Under the Conditions of the Southern Regions of the Republic of Tajikistan [Текст] / I.B. Makhsumov, **A.N. Davlatzoda** // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2025. – Vol. 18, No. 6. – P. 763-777. – ISSN 2313-6057.

Статьи, опубликованные в научных журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Scopus и Web of Science:

[6-А]. **Davlatzoda A.N.** Integration of Solar Power Plants into the Power Systems of Central Asia / I.B. Makhsumov, D.S. Silemonov, **A.N. Davlatzoda** // 2026 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, Russian Federation, 17-23 May 2026. – P. 1-5. DOI:10.1109/ICIEAM69213.2026.11549706.

Статьи, опубликованные в других журналах:

[7-А]. **Давлатзода А.Н.** Влияние деградации на эффективность работы фотоэлектрических модулей / И.Б. Махсумов, У.Х. Джалилов, **А.Н. Давлатзода,** О.Ҷ. Кобулов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Инженерные исследования, инновации и инвестиции в области энергетики и промышленности». – Институт энергетики Таджикистана, р-н. Кушониён, 25 апреля 2023 г. – С. 119-124.

[8-А]. **Давлатзода А.Н.** Деградация фотоэлектрических модулей: причины и последствия / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** З.С. Рахимов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Энергетика: состояние и перспективы развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 20 декабря 2023 г. – С. 241-248.

[9-А]. **Давлатзода А.Н.** Развития малой гидроэнергетики путь к защите окружающей среды и экологии / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** Н.М. Раупов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Энергетика: состояние и перспективы развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 20 декабря 2023 г. – С. 249-257.

[10-А]. **Давлатзода А.Н.** Понимание деградации солнечных панелей, её причин и последствий / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** С.О. Ибрагимов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Энергетика ключевое направление развития национальной экономики». – Институт энергетики Таджикистана, р-н. Кушониён, 22 декабря 2023 г. – С. 51-57.

[11-А]. **Давлатзода А.Н.** Понимание основ систем распределенной генерации и перспектив её развития / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** К.Ш. Шокиров // Материалы IX Международной научно-практической конференции: «Наука – основа инновационного развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 18-19 апреля 2024 г. – С. 10-14.

[12-А]. **Давлатзода А.Н.** Влияние распределенной генерации на работу электрической сети / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** К.Ш. Шокиров // Материалы IX

Международной научно-практической конференции: «Наука – основа инновационного развития». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 18-19 апреля 2024 г. – С. 14-18.

[13-А]. **Давлатзода А.Н.** Оценка эффективности солнечных панелей на крышах в условиях городской застройки / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** Б.В. Худоназаров, Д.С. Силемонов // Булатовские чтения: сборник статей IV Всероссийской с международным участием молодёжной конференции. – Томск, 10-12 декабря 2024 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 482-485.

[14-А]. **Давлатзода А.Н.** Влияние температурных и эксплуатационных факторов на эффективность солнечных модулей / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** З.С. Рахимов // Материалы Международной научно-практической конференции: «Развитие энергетической отрасли Таджикистана в период независимости». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 7 апреля 2025 г. – С. 228-235.

[15-А]. **Давлатзода А.Н.** Комплексный анализ факторов окружающей среды, влияющих на работу солнечных элементов: накопление пыли, температура окружающей среды и влажность / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** Н.Х. Одинаев // Материалы Международной научно-практической конференции: «Развитие энергетической отрасли Таджикистана в период независимости». – Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, 7 апреля 2025 г. – С. 236-245.

[16-А]. **Давлатзода А.Н.** Комплексное исследование факторов окружающей среды, влияющих на эксплуатацию солнечных элементов: пылеобразование, температура и влажность / И.Б. Махсумов, **А.Н. Давлатзода,** И.С. Носиров // Материалы II Международной научно-практической конференции: «Цифровая индустрия и энергетическое развитие глазами ученых и исследователей». – Институт энергетики Таджикистана, р-н. Кушониён, 25 апреля 2025 г. – С. 62-69.

[17-А]. **Давлатзода А.Н.** Энергетический ландшафт Центральной Азии и роль возобновляемых источников энергии в трансформации региональных энергосистем / И.Б. Махсумов, А.Н. Давлатзода, Б.М. Хасанзода // Научно-технический журнал «Тепловые электрические станции». – 2026. – № 1(5). – С. 10-17. ISSN 3033-5590.

АННОТАТСИЯ

ба автореферати диссертатсияи Давлатзода Абуфазл Нусратулло дар мавзуи «Моделсозии кори неругоҳҳои барқии офтобӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ», барои дарёфти дараҷаи илмии номзади илмҳои техникӣ аз рӯйи ихтисоси 2.3. Энергетика ва электротехника (2.3.4. Неругоҳҳои барқӣ ва системаҳои электроэнергетикӣ)

Калимаҳои калидӣ: неругоҳи барқи офтобӣ, модулҳои фотоэлектрикӣ, омилҳои ҳароратӣ, моделсозии математикӣ, самаранокии энергетикӣ, талафоти ҳароратӣ, истеҳсоли неруи барқ.

Мақсади таҳқиқот – таҳияи моделҳои математикии кори неругоҳҳои барқии фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ ва арзёбии таъсири онҳо ба нишондиҳандаҳои энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ барои баланд бардоштани дақиқии арзёбии истеҳсоли неруи барқ мебошад.

Объекти таҳқиқот – неругоҳи барқи офтобӣ ва модулҳои фотоэлектрикии он дар шароити тағйирёбии ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати корӣ.

Навгонии илмии таҳқиқот:

1. Қонуниятҳои таъсири ҳарорати муҳити атроф ва ҳарорати кории модулҳои фотоэлектрикӣ ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии онҳо муқаррар карда шуда, вобастагии иқтидори истеҳсолии модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорати корӣ муайян карда шудааст.

2. Модели математикии кори модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти таъсири омилҳои ҳароратӣ таҳия карда шудааст, ки имкон медиҳад тағйирёбии параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳо вобаста ба ҳарорати корӣ арзёбӣ карда шавад.

3. Модели регрессионии вобастагии ҳарорати кори модулҳои фотоэлектрикӣ аз ҳарорати муҳити атроф таҳия карда шуда, дар асоси он модели математикии кори модул дар муҳити барномавии MATLAB/Simulink такмил дода шудааст, ки барои арзёбии таъсири ҳарорат ба иқтидори истеҳсолӣ ва истеҳсоли неруи барқ истифода мегардад.

4. Методикаи ҳисоб ва арзёбии миқдории таъсири ҳарорат ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ таҳия карда шудааст, ки имконияти муайян намудани тағйирёбии нишондиҳандаҳои энергетикӣ ва талафоти ҳароратии модулҳоро ҳангоми тағйирёбии ҳарорати корӣ фароҳам меорад.

5. Модели математикии термомуҳофизати модулҳои фотоэлектрикӣ таҳия карда шуда, самаранокии он дар шароити ҳарорати баланд муҳити атроф арзёбӣ карда шудааст. Муайян карда шудааст, ки истифодаи термомуҳофизат имкон медиҳад ҳарорати сатҳи модули фотоэлектрикӣ то 3,5 ^{o}C паст карда шуда, таъсири ҳарорати баланд ба нишондиҳандаҳои энергетикии он коҳиш дода шавад.

Соҳаи татбиқ:

1. Методикаи ҳисоб ва арзёбии таъсири омилҳои ҳароратӣ ба параметрҳои электрикӣ ва энергетикии модулҳои фотоэлектрикӣ барои муайян кардани ҳарорати корӣ, тағйирёбии иқтидори истеҳсолӣ, талафоти ҳароратӣ ва самаранокии энергетикии модулҳо дар шароити ҳарорати баланди муҳити атроф дар раванди таълими муассисаҳои олии техникӣ метавонад мавриди истифода қарор дода шавад.

2. Модели математикии кори модулҳои фотоэлектрикӣ бо дарназардошти реҷаи ҳароратӣ ва термомуҳофизат, ки дар муҳити MATLAB/Simulink таҳия шудааст, барои таҳлили муқоисавии параметрҳои электрикӣ ҳангоми мавҷуд будан ва набудани термомуҳофизат, инчунин таҳқиқ ва моделсозии реҷаҳои кори модулҳои фотоэлектрикӣ истифода бурда мешавад.

3. Натиҷаҳои моделсозии низоми автономии фотоэлектрикӣ дар муҳити PVsyst ва модели математикии MATLAB/Simulink барои лоиҳакашӣ ва арзёбии истеҳсоли неруи барқ, тавозуни энергетикӣ ва талафоти ҳароратӣ дар ҶДММ «Руфтоб», инчунин дар раванди таълими Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон аз рӯйи фанҳои тахассусии ихтисосҳои «Манбаъҳои барқароршавандаи энергия» ва «Технологияи энергияи самарабахш дар энергетика» истифода бурда мешаванд.

АННОТАЦИЯ

к автореферату диссертации Давлатзода Абуфазл Нусратулло на тему «Моделирование работы солнечных электростанций с учётом влияния температурных факторов» на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.3. Энергетика и электротехника (2.3.4. Электрические станции и электроэнергетические системы)

Ключевые слова: солнечная электростанция, фотоэлектрические модули, тепловые факторы, математическое моделирование, энергоэффективность, тепловые потери, выработка электроэнергии.

Целью исследования является разработка математических моделей работы фотоэлектрических электростанций с учётом влияния температурных факторов и оценка их влияния на энергетические показатели фотоэлектрических модулей для повышения точности оценки выработки электроэнергии.

Объектом исследования диссертационной работы являются солнечная электростанция и её фотоэлектрические модули в условиях изменения температуры окружающей среды и рабочей температуры.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Установлены закономерности влияния температуры окружающей среды и рабочей температуры фотоэлектрических модулей на их электрические и энергетические параметры, установлена зависимость генерируемой мощности фотоэлектрических модулей от рабочей температуры.

2. Математическая модель работы фотоэлектрических модулей разработана с учётом влияния температурных факторов, что позволяет оценить изменение электрических и энергетических параметров модулей в зависимости от рабочей температуры.

3. Разработана регрессионная модель зависимости рабочей температуры фотоэлектрических модулей от температуры окружающей среды, на её основе усовершенствована математическая модель работы модуля в программной среде MATLAB/Simulink, которая используется для оценки влияния температуры на производственную мощность и выработку электроэнергии.

4. Разработана методика расчёта и количественной оценки влияния температуры на электрические и энергетические параметры фотоэлектрических модулей, позволяющая определить изменение энергетических показателей и тепловые потери модулей при изменении рабочей температуры.

5. Разработана математическая модель термозащиты фотоэлектрических модулей, оценена её эффективность в условиях высоких температур окружающей среды. Установлено, что применение термозащиты позволяет снизить температуру поверхности фотоэлектрического модуля до 3,5 ºС, уменьшая влияние высоких температур на его энергетические показатели.

Область применения:

1. Методика расчёта и оценки влияния температурных факторов на электрические и энергетические параметры фотоэлектрических модулей может применяться для определения рабочих температур, колебаний производственной мощности, тепловых потерь и энергоэффективности модулей в условиях высокой температуры окружающей среды в процессе обучения в высших технических учебных заведениях.

2. Математическая модель работы фотоэлектрических модулей с учётом температурных режимов и режимов термозащиты, разработанная в среде MATLAB/Simulink, используется для сравнительного анализа электрических параметров при наличии и отсутствии термозащиты, а также для исследования и моделирования режимов работы фотоэлектрических модулей.

3. Результаты моделирования фотоэлектрической автономной системы в среде PVsyst и математической модели MATLAB/Simulink используются для проектирования и оценки выработки электроэнергии, энергетического баланса и тепловых потерь в ООО «Руфтоб», а также в учебном процессе Института энергетики Таджикистана по специальностям «возобновляемые источники энергии» и «энергоэффективные технологии в энергетике».

ANNOTATION

to the dissertation synopsis of Davlatzoda Abufazl Nusratullo entitled «Modeling the Operation of Solar Power Plants Taking into Account the Influence of Temperature Factors», submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 2.3. Energy and Electrical Engineering (2.3.4. Power Plants and Electric Power Systems)

Keywords: solar power plant, photovoltaic modules, thermal factors, mathematical modeling, energy efficiency, heat losses, electricity generation.

The aim of the research is to develop mathematical models of the operation of photovoltaic power plants, taking into account the influence of temperature factors and assessing their impact on the energy performance of photovoltaic modules to improve the accuracy of estimating electricity generation.

The object of the dissertation research is a solar power plant and its photovoltaic modules under conditions of changing ambient temperature and operating temperature.

Scientific novelty of the research:

1. The patterns of influence of ambient temperature and operating temperature of photovoltaic modules on their electrical and energy parameters have been established, and the dependence of the production capacity of photovoltaic modules on the operating temperature has been established.

2. A mathematical model of the operation of photovoltaic modules has been developed taking into account the influence of temperature factors, which makes it possible to estimate the change in the electrical and energy parameters of the modules depending on the operating temperature.

3. A regression model of the dependence of the operating temperature of photovoltaic modules on the ambient temperature has been developed. Based on it, the mathematical model of the module's operation in the MATLAB/Simulink software environment has been improved, which is used to assess the effect of temperature on production capacity and electricity generation.

4. A methodology has been developed for calculating and quantifying the effect of temperature on the electrical and energy parameters of photovoltaic modules, which makes it possible to determine the change in energy parameters and thermal losses of modules when the operating temperature changes.

5. A mathematical model of thermal protection of photovoltaic modules has been developed, and its effectiveness in high ambient temperatures has been evaluated. It has been established that the use of thermal protection makes it possible to reduce the surface temperature of the photovoltaic module to 3.5 °C, reducing the effect of high temperatures on its energy performance.

Field of application:

1. The methodology for calculating and evaluating the influence of temperature factors on the electrical and energy parameters of photovoltaic modules can be used to determine operating temperatures, fluctuations in production capacity, heat losses and energy efficiency of modules at high ambient temperatures in the process of studying at higher technical educational institutions.

2. A mathematical model of the operation of photovoltaic modules, taking into account temperature and thermal protection modes, developed in the MATLAB/Simulink environment, is used for comparative analysis of electrical parameters in the presence and absence of thermal protection, as well as for research and modeling of the operating modes of photovoltaic modules.

3. The results of modeling a photovoltaic autonomous system in the PVsyst environment and the MATLAB/Simulink mathematical model are used to design and evaluate electricity generation, energy balance and heat losses at Ruftob LLC, as well as in the educational process of the Institute of Energy of Tajikistan in the specialties «renewable energy sources» and «energy-efficient technologies in the energy sector».

Подписано к печати 12.10.2026 Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии Института энергетики Таджикистана.
733036, Республика Таджикистан, Хатлонская область, Кушониёнский район.

Ба чоп 12.10.2026 имзо шуд. Андоза 60х84 1/16.
Қоғази офсетӣ. Адади нашр 100 нусха.
Нашриёти Донишкадаи энергетикии Тоҷикистон.
733036, Ҷумҳурии Тоҷикистон, вилояти Хатлон, ноҳияи Кӯшониён.