FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/2025.27.12.T.19.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH

FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI XO‘JA AHMAD YASSAVIY NOMIDAGI XALQARO QOZOQ–TURK UNIVERSITETI

KIBISHOV ADILXAN TALGATOVICH

VAKUUMLI FRAKTAL QUYOSH SUV ISITISH KOLLEKTOR QURILMASINI ISHLAB CHIQISH

05.05.06 – Qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari

TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Farg‘ona – 2026

UDK 662.997

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

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам

Contents of the Dissertation Abstract of Philosophy Doctor (PhD) on technical sciences

Kibishov Adilxan Talgatovich
Vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektor qurilmasini ishlab chiqish..... **3**

Кибишов Адылхан Талгатович
Разработка вакуумного фрактального солнечного водонагревательного коллекторного устройства ……..... **21**

Kibishov Adylkhan Talgatovich
Development of a vacuum fractal solar water-heating collector device …..... **39**

E’lon qilingan ishlar ro‘yxati
Список опубликованных работ
List of published works..... **44**

FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI PhD.03/2025.27.12.T.19.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH

FARG‘ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI XO‘JA AHMAD YASSAVIY NOMIDAGI XALQARO QOZOQ–TURK UNIVERSITETI

KIBISHOV ADILXAN TALGATOVICH

VAKUUMLI FRAKTAL QUYOSH SUV ISITISH KOLLEKTOR QURILMASINI ISHLAB CHIQISH

05.05.06 – Qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari

TEXNIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Farg‘ona – 2026

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2023.4.PhD/T4243 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya ishi Farg‘ona davlat texnika universiteti va Xo‘ja Ahmad Yassaviy nomidagi Xalqaro qozoq-turk universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.fstu.uz) va «ZiyoNet» Axborot ta’lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	**Avezova Nilufar Rabbanakulovna** texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim
Rasmiy opponentlar:	**Matchanov Nuraddin Azadovich** texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim
	Voxidov Akmal Ulashevich texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)
Yetakchi tashkilot:	Osh texnologiya universiteti (Qirg‘iziston Respublikasi)

Dissertatsiya himoyasi Farg‘ona davlat texnika universiteti huzuridagi PhD.03/2025.27.12.T.19.01 raqamli Ilmiy kengashning 2026 yil “28” 11 soat 10⁰⁰ dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. Manzil: 150100, Farg‘ona sh. Farg‘ona k. 86 uy. Tel: (+99873) 241-12-06, faks (+99873) 241-12-06, e-mail: ilmiy-kengash@ferpi.uz, kichik majlislar zali.

Dissertatsiya bilan Farg‘ona davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№357 raqami bilan ro‘yxatga olingan). Manzil: 150100, Farg‘ona sh. Farg‘ona k. 86 uy. Farg‘ona davlat texnika universiteti. Tel: (+99873) 241-12-06.

Dissertatsiya avtoreferati 2026 yil «10» 11 kuni tarqatildi.
(2026 yil «10» 11 dagi № 6 raqamli reestr bayonnomasi).

U.R. Salomov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy kengash raisi, t.f.d., professor

A.A. Quchqorov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi, PhD, dotsent

L.K. Mamadaliyeva
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, t.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda markazlashmagan issiqlik ta’minoti tizimlarining rivojlanishi sharoitida quyosh nurlanishining qayta tiklanuvchi energiyasidan foydalanadigan quyosh suv isitish kollektorlarini qo‘llashga qiziqish ortib bormoqda. Quyosh suv isitish qurilmalari, ayniqsa kichik quvvatli avtonom tizimlar tarkibida, organik yoqilg‘i sarfisiz issiq suv ta’minoti yuklamasini ishonchli va barqaror qoplashini hisobga olganda, bunday tizimlar turli sohalarda keng qo‘llanilmoqda. Jahonda quyosh suv isitish kollektorlarining o‘rnatilgan jami issiqlik quvvati yiliga o‘rtacha 13 % ga yaqin o‘sish sur’atida 500 GW dan oshganligi nuqtai nazaridan[1], qayta tiklanuvchi manbalarga asoslangan bunday energiya qurilmalari energiya samaradorligini oshirishning samarali yechimi hisoblanadi. Shu bilan birga, past insolyatsiya va manfiy atrof-muhit haroratlarida issiqlik unumdorligini saqlab qoladigan vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektor qurilmasini ishlab chiqish dolzarb hisoblanadi.

Jahonda quyosh suv isitish kollektorlarining samaradorligini korpusni vakuumlash, nurlanishni optik mujassamlashtirish va nur yutuvchi absorber geometriyasini takomillashtirish hisobiga oshirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bunda quyosh radiatsiyasi oqimi zichligi pasaygan va o‘zgaruvchan bulutlilik sharoitida issiqlik energiyasining barqaror ishlab chiqarilishini ta’minlash maqsadida bunday qurilmalarning konstruktiv-rejim parametrlarini ishlab chiqish va optimallashtirishga alohida e’tibor qaratilmoqda[2]. Bundan tashqari, vakuumlangan bo‘shliqlarda radiatsion-konvektiv issiqlik almashinuvini sonli modellashtirish hamda hisoblash modellarini tabiiy iqlim sharoitida eksperimental verifikatsiyalashga alohida e’tibor berilmoqda.

Respublikamizda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan keng foydalanish va samaradorligini oshirishga yordam beradigan yangi texnologiyalarni yaratish bo‘yicha tadqiqotlar o‘tkazish va ularni amalda qo‘llash bo‘yicha keng ko‘lamli chora-tadbirlar amalga oshirilmoqda. 2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan «Iqtisodiyotni elektr energiyasi bilan uzluksiz ta’minlash hamda “Yashil iqtisodiyot” texnologiyalarini barcha sohalarga faol joriy etish, iqtisodiyotning energiya samaradorligini 20 foizga oshirish»[3] bo‘yicha vazifalari belgilangan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda, xususan, qayta tiklanuvchi energiya manbalari asosida yangi ishlab chiqarish quvvatlarini qurish va mavjudlarini modernizatsiya qilish, jumladan fraktal quyosh suv isitgichi kollektorining konstruksiyasini takomillashtirish, quyosh insolyatsiyasi va atrof-muhit harorati past bo‘lgan sharoitlarda uning barqaror issiqlik unumdorligini ta’minlash hamda kollektorning issiqlik-texnikaviy ko‘rsatkichlarini hisoblash usullarini ishlab chiqish va ularning maqbul parametrlarini aniqlash muhim hisoblanadi.

---

[1] Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends. Detailed Market Figures. – IEA Solar Heating & Cooling Programme.

[2] Barone G., Buonomano A., Kalogirou S.A., Ktistis P.K., Palombo A. A holistic methodology for designing novel flat plate evacuated solar thermal collectors: Modelling and experimental assessment // Renewable Energy, 2024, Vol. 232, 120967. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120967

[3] Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2022 йил 28 январдаги ПФ-60-сон “2022-2026 йилларга мўлжалланган Янги Ўзбекистоннинг тараққиёт стратегияси тўғрисида”ги Фармони.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi PF-60-son «2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida»gi Farmoni, 2019 yil 22 avgustdagi PQ-4422-son «Iqtisodiyot tarmoqlari va ijtimoiy sohaning energiya samaradorligini oshirish, energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etish va qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirishning tezkor chora-tadbirlari to‘g‘risida», 2020 yil 10 iyuldagi PQ-4779-son «Iqtisodiyotning energiya samaradorligini oshirish va mavjud resurslarni jalb etish orqali iqtisodiyot tarmoqlarining yoqilg‘i-energetika mahsulotlariga qaramligini kamaytirishga doir qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida»gi Qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me’yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining IV–“Qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish usullarini rivojlantirish, nanotexnologiyalar, fotonika va boshqa zamonaviy ilg‘or texnologiyalar asosida qurilmalar va texnologiyalarni yaratish” ustuvor yo‘nalishiga hamda “Qozog‘iston Respublikasida oliy ta’lim va fanni rivojlantirishning 2023–2029-yillarga mo‘ljallangan konsepsiyasi”ga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Vakuumli va mujassamlashtiruvchi konstruksiyalarni o‘z ichiga olgan quyosh suv isitish kollektorlarining issiqlik samaradorligi va ishonchliligini oshirish masalalari bilan xorijda J.A. Duffie, W.A. Beckman, S.A. Kalogirou, W. Zima, A.A. Hachicha, A. Mwesigye, B. Zou, Z. Tian, G. Barone, A. Buonomano, S.K. Verma, E. Vengadesan, R. Senthil, Y. Liu, J. Zheng va boshqalar shug‘ullangan. Bundan tashqari, ushbu soha rivojiga F.R. Menter, P.J. Roache, M. Fatouh, S. Akbarzadeh, M.S. Valipour, J. Mahakud va B. Kundu katta hissa qo‘shgan bo‘lib, ularning ishlari quyosh kollektorlari qabul qilgichlarida radiatsion va turbulent issiqlik almashinuvi modellarini qurish, sonli yechimlarni verifikatsiyalash hamda absorberlar geometriyasini optimallashtirishga qaratilgan. Ularning tadqiqot natijalari quyosh issiqlik qurilmalarini hisobiy loyihalash va sonli modellashtirishning zamonaviy yondashuvlariga asos bo‘lgan.

Qozog‘istonlik tadqiqotchilar orasida N.T. Rustamov, A.T. Meyrbekov, M. Kunelbayev, T. Merembayev, A.E. Baybolov, P.A. Nesterenkov hamda quyosh suv isitish qurilmalarini yaratish va takomillashtirishning nazariy va amaliy jihatlari rivojiga salmoqli hissa qo‘shgan boshqa olimlarni ta’kidlash lozim. Ularning ishlari kollektorlarning issiqlik samaradorligini oshirish, issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirish hamda Qozog‘iston Respublikasining muhofaza hujjatlari bilan himoyalangan nur yutuvchi elementlarning fraktal komponovkalarini ishlab chiqishga qaratilgan.

O‘zbekistonda quyosh energiyasini issiqlikka aylantirish va quyosh suv isitish kollektorlarining samaradorligini oshirish masalalari ham tadqiqotlarning ustuvor yo‘nalishi hisoblanadi. Ushbu sohaga R.R. Avezov, N.R. Avezova, A.U. Voxidov, Yu.K. Rashidov, M.A. Mamatqosimov, S.A. Orlov, A.A. Quchqorov, E.Yu. Raximov katta hissa qo‘shgan bo‘lib, ular nur yutuvchi panellarning issiqlik yo‘qotish koeffitsiyentini aniqlash, yassi kollektorlarda quyosh energiyasini issiqlikka aylantirish jarayonlarini modellashtirish hamda ularning konstruktiv-rejim parametrlarini

optimallashtirish masalalari bilan shug‘ullanadilar. Ularning tadqiqotlari O‘zbekistonning turar-joy, kommunal-maishiy va sanoat obyektlarining issiq suv ta’minoti tizimlarida quyosh suv isitish texnologiyalarini amaliy qo‘llashga xizmat qilmoqda.

Shunday qilib, ilmiy manbalar tahlili shuni ko‘rsatadiki, vakuumli va mujassamlashtiruvchi quyosh suv isitish kollektorlari sohasidagi salmoqli yutuqlarga qaramay, vakuumlangan bo‘shliqda nur yutuvchi elementlarni joylashtirish qonunini asoslash, o‘zgaruvchan insolyatsiyada issiqlik unumdorligi dinamikasini tavsiflash hamda fraktal konstruksiyalarni kompleks eksperimental-sonli verifikatsiyalash bilan bog‘liq hal etilmagan masalalar saqlanib qolmoqda, bu esa ushbu yo‘nalishdagi keyingi tadqiqotlarning dolzarbligini belgilaydi.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Xo‘ja Ahmad Yassaviy nomidagi Xalqaro qozoq-turk universiteti Injenerlik fakulteti «Elektroinjenerlik» kafedrasi hamda Farg‘ona davlat texnika universiteti «Energetika» fakulteti «Elektronika va asbobsozlik» kafedrasining «Qayta tiklanuvchi energiya manbalari» ilmiy yo‘nalishi bo‘yicha ilmiy-tadqiqot ishlari dasturlari rejalariga muvofiq hamda FZ-2020100661-son «O‘zbekistonning turli tabiiy-iqlim mintaqalarida iste’molchilarni energiya bilan ta’minlash uchun avtonom fotoelektrik stansiyalarning optimal konfiguratsiyalarini asoslash maqsadida energiyani jamlash va o‘zgartirishning kombinatsiyalangan tizimlarini nazariy-hisobiy va amaliy tadqiq etish» fundamental loyihasi (2021–2025) doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi vakuumlangan fraktal quyosh suv isitgichi kollektorining konstruksiyasini takomillashtirish, quyosh insolyatsiyasi va atrof-muhit harorati past bo‘lgan sharoitlarda uning barqaror issiqlik unumdorligini ta’minlash hamda kollektorning issiqlik-texnikaviy ko‘rsatkichlarini hisoblash usullarini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

quyosh issiq suv ta’minoti tizimlarining hozirgi holati va rivojlanish tendensiyalarini, yassi, vakuumli, konsentratsiyalovchi va fraktal kollektorlar konstruksiyalarini hamda muhofaza hujjatlarini tanqidiy tahlil qilib ilmiy bo‘shliqni aniqlash va shu asosda vakuumlangan fraktal quyosh suv isitgichi kollektorining takomillashtirilgan konstruksiyasini ishlab chiqish;

o‘tkinchi jarayonlarni hisoblash va konstruktiv-rejim parametrlarini optimallashtirish mezonlarini shakllantirish imkonini beruvchi, uzatish funksiyalari apparatidan foydalanilgan elektr-issiqlik analogiyasiga asoslangan kollektorning issiqlik balansi matematik modelini va dinamik modelini ishlab chiqish;

kollektorda radiatsion-konvektiv issiqlik almashinuvining CFD-modelini ishlab chiqish, toroidal yaruslar soni va geometriyasi, oriyentatsiya hamda rejim parametrlarining energetik xarakteristikalarga ta’siri qonuniyatlarini aniqlash va qurilmaning ratsional konfiguratsiyasini asoslash;

kollektor tajriba namunasini tabiiy sharoitlarda o‘lchash noaniqligini baholagan holda eksperimental tadqiq etish, ishlab chiqilgan modellarni verifikatsiyalash hamda energetik samaradorlikni yassi quyosh suv isitgichi kollektoriga nisbatan qiyosiy baholash.

Tadqiqotning obyekti issiq suv ta’minoti tizimlarida qo‘llash uchun mo‘ljallangan, parabolik aperturali va absorberlarning toroidal batareyasiga ega vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektor qurilmasi hisoblanadi.

Tadqiqotning predmeti ko‘rilayotgan kollektorning vakuumlangan bo‘shlig‘ida quyosh energiyasini issiqlikka aylantirish va radiatsion-konvektiv issiqlik almashinuvi jarayonlari, shu jumladan uning issiqlik-texnik xarakteristikalarini baholash usullari va issiqlik energiyasini ishlab chiqarish samaradorligi, shuningdek qurilmaning umumiy foydali ish koeffitsiyentiga ta’sir etuvchi omillar hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari. Ish jarayonida tizimli tahlil usullari, issiqlik texnikasi nazariy asoslari va issiqlik uzatish nazariyasi usullari, termodinamika nazariyasi usullari, ANSYS Fluent dasturiy muhitida hisoblash gidrodinamikasi va radiatsion issiqlik almashinuvi usullari, uzatish funksiyasi nazariyasi hamda o‘lchash noaniqligini baholash bilan tabiiy eksperiment usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

yaruslarning o‘zaro soyalanishini bartaraf etish va nur yutuvchi strukturaning masshtab invariantligini ta’minlash imkonini beruvchi, parabolik aperturali vakuumlangan bo‘shliqda toroidal absorberlarni oltin kesim qonuni asosida iyerarxik joylashtirishga asoslangan vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektorining takomillashtirilgan konstruksiyasi ishlab chiqilgan;

birinchi tartibli analitik uzatish funksiyasi yordamida o‘tkinchi jarayonlarni hisoblash imkonini beruvchi hamda quyi chastotali filtr xususiyatlari hisobiga o‘zgaruvchan bulutlilik sharoitida issiqlik unumdorligining barqarorligini ta’minlovchi kollektorning dinamik matematik modeli ishlab chiqilgan;

yaruslararo radiatsion almashinuvni va egri chiziqli kanallardagi ikkilamchi oqimlarni hisobga olgan holda radiatsion-konvektiv issiqlik almashinuvini CFD-modellashtirishga asoslangan kollektorning energetik xarakteristikalarini hisoblash metodikasi takomillashtirilgan;

bo‘shliqni vakuumlash hisobiga issiqlik yo‘qotishlarini kamaytirish va o‘rtacha vaznlantirilgan issiqlik FIKini 66,0 % gacha oshirish imkonini beruvchi, selektiv qoplamali energiya tejamkor vakuumlangan fraktal quyosh suv isitish kollektor qurilmasi ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

markaziy ta’minot tizimidan uzoqda joylashgan iste’molchilarni avtonom issiq suv bilan ta’minlash uchun iqtisodiy jihatdan samarali va barqaror bo‘lgan, suvni 64,1 °C gacha isitish hamda o‘rtacha insolyatsiya 529 W/m² gacha bo‘lganda sutkalik ishlab chiqarishni aperturaning 1 m² yuzasiga 2,81 kW·h gacha ta’minlash imkonini beruvchi vakuumlangan fraktal quyosh suv isitish kollektorining tajriba namunasi ishlab chiqilgan va yaratilgan;

toroidal yaruslarni oltin kesim qonuni bo‘yicha joylashtirishni bo‘shliqni vakuumlash bilan uyg‘unlashtirish kollektorning o‘rtacha vaznlantirilgan issiqlik samaradorligi koeffitsiyentini 66,0 % gacha oshirish va issiqlik yo‘qotishlarini aperturaga tushayotgan energiyaning 4,4 % i gacha kamaytirish imkonini berishi hisobiy va eksperimental tadqiqotlar asosida asoslab berilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektorining optik-radiatsion, issiqlik-texnik va energetik ko‘rsatkichlarining o‘zaro

bog‘liqligi, hisobiy natijalarning eksperimental sinov ma’lumotlariga mosligi (sutkalik harorat o‘zgarishi bo‘yicha dinamik model uchun 1,41 % va CFD-model uchun 1,35 % farq, issiqlik foydali ish koeffitsiyentini aniqlashning kengaytirilgan noaniqligi 5,5 % va qamrov koeffitsiyenti k = 2 da) hamda olingan natijalar termodinamikaning asosiy qonunlariga zid emasligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektorlarini hisoblash nazariyasini rivojlantirishdan hamda toroidal yaruslarni joylashtirish qonuni, ularning soni, sirtlarning optik xarakteristikalari va issiqlik tashuvchi harakat rejimining tizim samaradorligiga ta’sirini baholash imkonini beruvchi matematik modelni ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati parabolik apertura, absorberlarning toroidal batareyasi, vakuumlangan bo‘shliq va akkumulyator bakini o‘z ichiga olgan vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektor qurilmasini ishlab chiqilganligi bilan belgilanadi. Ushbu qurilmani qo‘llash yilning o‘tish davrida suvni 64,1 °C gacha isitish, o‘rtacha vaznlashtirilgan issiqlik foydali ish koeffitsiyentini 66,0 % ga yetkazish hamda issiq suv ta’minoti ehtiyojlari uchun yoqilg‘i-energetika resurslarining o‘rnini yil davomida 60 % gacha qoplash imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Issiq suv ta’minoti tizimlari uchun vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektor qurilmasini ishlab chiqish bo‘yicha olingan natijalar asosida:

fraktal absorberlar bilan jihozlangan vakuumli fraktal quyosh suv isitgich kollektori konstruksiyasi va issiqlik unumdorligining barqarorligini ta’minlovchi kollektorning dinamik matematik modeli Toshkent davlat texnika universitetida ta’lim jarayonida hamda F-OT-2021-497-sonli fundamental loyihasini bajarishda foydalanilgan (O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi Oliy ta’lim rivojlanishini tadqiq etish markazining 2025-yil 23-sentabrdagi 02/01-01-365-son ma’lumotnomasi). Natijada, gibrid fotoelektr-issiqlik qurilmasining issiqlik konturini modellashtirish va tajriba namunasini ishlab chiqish imkoniyati yaratilgan;

vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektori (IAP36213) «Kentau transformator zavodi» AJ obyektida joriy qilingan (Qozog'iston respublikasi «Kentau transformator zavodi» AJ ni 2025-yil 25-apreldagi 1-son ma’lumotnomasi). Natijada, yilning sovuq davrida issiq suv ta’minoti ehtiyojlari uchun foydalaniladigan yoqilg‘i-energetika resurslari qariyb 60 % ga tejalishiga erishilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqotning asosiy natijalari Qozog‘iston Respublikasi va O‘zbekiston Respublikasida o‘tkazilgan 4 ta xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyada ma’ruza qilingan va muhokamadan o‘tgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 15 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan, O‘zbekiston Respublikasi va Qozog‘iston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyalarining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 9 ta maqola, jumladan, 2 tasi xorijiy (Scopus Q1 va Q2 ma’lumotlar bazasida referatlangan) jurnallarda nashr etilgan hamda 1 ta Qozog‘iston Respublikasi ixtiroga patenti olingan.

Dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi. Dissertatsiya kirish, to‘rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 120 sahifani tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi qayd etilgan, muammoning o‘rganilganlik darajasi bo‘yicha tahlil natijalari keltirilgan, maqsad va vazifalar shakllantirilgan, tadqiqot obyekti, predmeti va usullari ko‘rsatilgan, ilmiy yangilik bayon etilgan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarni joriy etish va ishning aprobatsiyasi, shuningdek dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi haqida qisqacha ma’lumotlar berilgan.

Dissertatsiyaning birinchi bobi **«Quyosh suv isitish kollektorlarining samaradorligini oshirishning hozirgi holati va ilmiy-metodik asoslari»da** O‘zbekiston Respublikasi va Qozog‘iston Respublikasida quyosh issiq suv ta’minoti tizimlarining hozirgi holati va rivojlanish tendensiyalari tahlil qilingan, yassi, vakuumli, mujassamlashtiruvchi va fraktal kollektorlar konstruksiyalarining qiyosiy tahlili o‘tkazilgan, ularning energetik samaradorligini belgilovchi issiqlik-fizik jarayonlar va omillar hamda issiqlik, gidrodinamik va radiatsion jarayonlarni matematik va sonli modellashtirish usullari ko‘rib chiqilgan.

An’anaviy yassi quyosh suv isitish kollektorlari (YQSIK) ning 800 W/m² quyosh radiatsiyasi oqimi zichligida 50–65 % ni tashkil etuvchi issiqlik samaradorligi qishki ekspluatatsiya sharoitida umumiy energetik balansda issiqlik yo‘qotishlari ulushining ortishi hisobiga 30 % va undan pastgacha kamayishi aniqlangan. Samaradorlikni oshirishning ma’lum yo‘llaridan har biri yo‘qotishlarni bostirish mexanizmlarining faqat bir qismini amalga oshirishi ko‘rsatilgan: yassi kollektorlar absorberi geometriyasini murakkablashtirish issiqlik samaradorligining 5–24 % ga o‘sishini beradi, biroq ishchi harorat ortishi bilan yo‘qotishlarning o‘sishi bilan cheklangan; vakuumlash yo‘qotishlarning konvektiv tashkil etuvchisini so‘ndiradi, lekin radiatsion almashinuvning nisbiy rolini oshiradi, bunda sirtlarning nurlanish qobiliyati o‘zgarishi vakuumli konstruksiyalarning issiqlik yo‘qotish koeffitsiyentini 98,5 % gacha oshirishi mumkin; mujassamlashtiruvchi tizimlar esa nurlanishning sochilgan tashkil etuvchisi yo‘qotilishi va Quyoshni kuzatish zarurati evaziga yuqori nur oqimi zichligini ta’minlaydi.

Modellashtirish usullari tahlili shuni ko‘rsatdiki, vakuumli fraktal kollektordagi jarayonlarni yetarli aniqlikda tavsiflash usullarning birorta sinfi bilan alohida ta’minlanmaydi va radiatsion chegaraviy shartlarni to‘g‘ri berish, turbulentlik modelini asoslash, yechimning to‘r mustaqilligini tasdiqlash hamda tabiiy ma’lumotlar bo‘yicha verifikatsiyalash orqali «matematik model – CFD-tahlil – sezgirlik tahlili – eksperimental verifikatsiya» uslubiy bog‘lamini qo‘llashni talab etadi.

O‘zbekiston Respublikasi, Qozog‘iston Respublikasi, Rossiya Federatsiyasi va uzoq xorij mamlakatlarining intellektual mulkni muhofaza qiluvchi hujjatlarning 2018–2026-yillar davri bo‘yicha patent-axborot tahlili shuni ko‘rsatdiki, tadqiq etilayotgan konstruksiyaning alohida tashkil etuvchilari – vakuumlash, parabolik mujassamlashtiruvchi, ikkilamchi qaytargichlar, fazoviy rivojlangan oqimli absorberlar, selektiv qoplamalar va kuzatish – patent hujjatlarida keng ifodalangan, biroq ularning iyerarxik (fraktal) joylashtirilgan toroidal issiqlik almashinuv elementli yagona qurilmada integratsiyasi amalda ishlab chiqilmagan. To‘g‘ridan-to‘g‘ri fraktal joylashtirish faqat mazkur tadqiqot bajarilayotgan KZ №2639 → KZ №36213 bazaviy patent liniyasida kuzatiladi. Aniqlangan ilmiy bo‘shliq asosida dissertatsiyaning maqsad va vazifalari shakllantirilgan.

Dissertatsiyaning ikkinchi bobi **«Vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektori konstruksiyasini nazariy asoslash va matematik modellashtirish»da** vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektori (VFQSIK) qurilmasining fizik konsepsiyasi shakllantirilgan, absorberning fraktal-toroidal strukturasi geometrik parametrlangan, optik va issiqlik modellari hamda elektr-issiqlik analogiyasiga asoslangan dinamik model qurilgan.

Ishlab chiqilgan kollektorning prinsipial sxemasi 1-rasmda keltirilgan. Qurilma yagona korpusda nurlanishni fokal zonaga mujassamlashtiruvchi parabolik aperturani, konvektiv yo‘qotishlarni bostiruvchi vakuumlangan bo‘shliqni hamda yaruslar bo‘ylab joylashgan toroidal absorberlar batareyasini birlashtiradi. Issiqlik tashuvchi «periferiyadan fokusga» kaskadli harakatlanadi, bu uning isish ketma-ketligini yaruslar bo‘yicha nur oqimi zichligi taqsimoti bilan muvofiqlashtiradi.

Toroidal yarusning yuzasi va hajmi Gulden teoremasi bo‘yicha aniqlanadi:

$$S_L = 4 \cdot \pi^2 \cdot R_L \cdot r_L, \qquad (1)$$

bu yerda R_L – yarus o‘q chizig‘ining radiusi, r_L – yasovchi aylana radiusi.

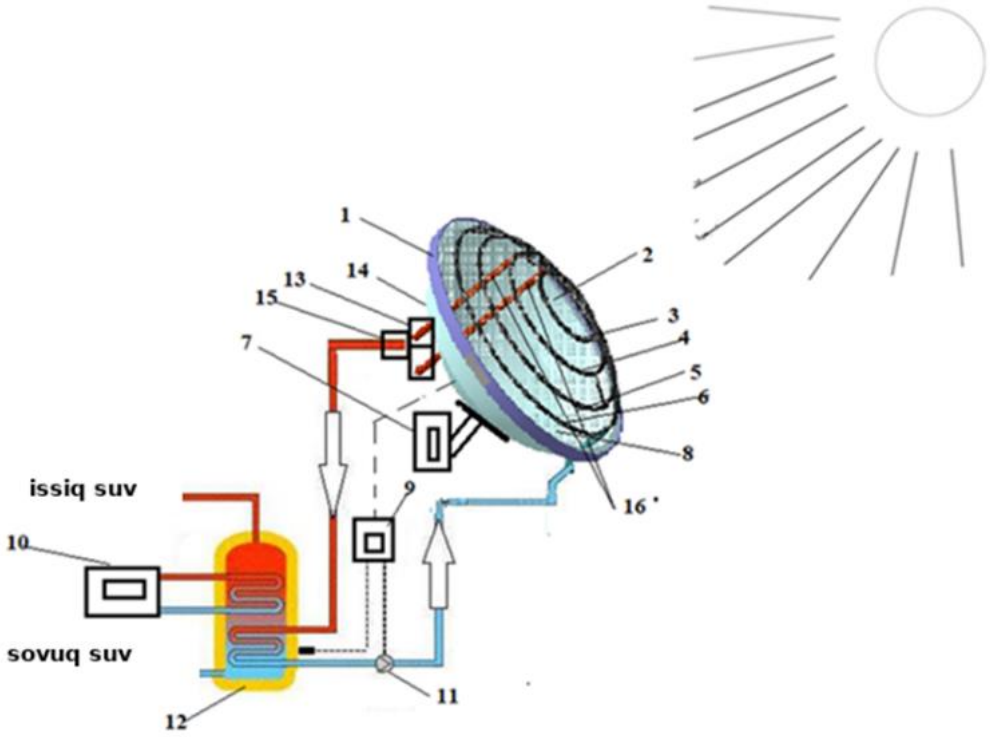
Yaruslarni aperturada joylashtirish qonuni oltin kesim bilan asoslangan: qo‘shni yaruslar radiuslarining nisbati $\varphi = 1{,}618$ ga teng qabul qilinadi, bu ularning o‘zaro soyalanmasligi shartidan ($\varphi^2 = \varphi + 1$ xossasi) kelib chiqadi va strukturaning masshtabli invariantligini ta’minlaydi:

$$R_L = R_1 \cdot \varphi^{(L-1)}, \qquad L = 1, 2, \ldots, N, \qquad (2)$$

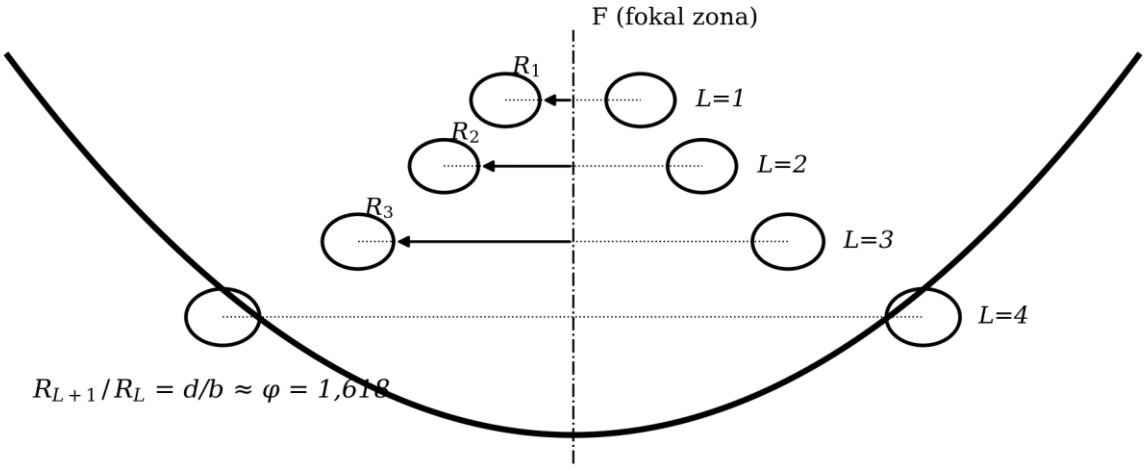
Nuq qabul qilgichning nur yutuvchi sirtining umumiy yuzasi esa geometrik progressiya yig‘indisi bilan ifodalanadi:

$$S_\Sigma = \Sigma\, S_L = 4 \cdot \pi^2 \cdot \Sigma\, R_L \cdot r_L, \qquad L = 1 \ldots N. \qquad (3)$$

Yaruslarni parabolik aperturada iyerarxik joylashtirish sxemasi 2-rasmda keltirilgan. Uch yarusli batareya uchun nur yutuvchi sirtning umumiy yuzasi 0,251 m^2 ni, apertura yuzasiga nisbati 0,465 ni, geometrik konsentratsiya koeffitsiyenti esa 2,15 ni tashkil etadi.



1-rasm. Vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektorining prinsipial sxemasi: *1 – silikon zichlagich, 2 – bromosilikat shishadan vakuumlangan sirt, 3 – birinchi toroidal fraktal (fokal) soha, 4, 5 – oraliq toroidal fraktal quvurlar, 6 – chetki toroidal fraktal (sovuq suv kirishi) soha, 7 – Quyoshni kuzatuvchi ikki o‘qli mexanizm, 8 – yuqori selektiv qoplamali alyuminiy absorber, 9 – kontroller, 10 – harorat datchigi, 11 – nasos, 12 – issiqlik almashtirgich, 13 – issiqlik taqsimlagich, 14 – vakuumlangan parabolik mujassamlashtirgich, 15 – issiq suvni olish uzeli, 16 – turli haroratli suv chiqishi.*



2-rasm. Toroidal yaruslarni parabolik aperturada iyerarxik joylashtirish sxemasi

L-yarus sirtida yutilgan nur oqimining zichligi to‘g‘ridan-to‘g‘ri va mujassamlashtirgichdan qaytgan nurlanishning birgalikdagi ta’siri bilan aniqlanadi:

$$q_L = \alpha \cdot [\gamma_L \cdot \rho_k \cdot \tau_{sh} \cdot I_{ap} \cdot A_{k,L} + (\tau\alpha)_{ef} \cdot I_{ap} \cdot A_{pr,L}] / S_L, \quad (4)$$

bu yerda α – selektiv qoplamaning yutish koeffitsiyenti, ρ_k – konsentratorning qaytarish koeffitsiyenti, τ_{sh} – yorug‘lik o‘tkazuvchi qoplamaning o‘tkazish koeffitsiyenti, γ_L –

L -yarusga yo‘naltirilgan oqim ulushi. Traktning hisobiy optik samaradorligi $\tau_{sh} = 0{,}90$, $\rho_k = 0{,}90$ va $\alpha = 0{,}93$ da to‘g‘ri nurlanish bo‘yicha $\eta_o = 0{,}702$ ni tashkil etadi.

Kollektor issiqlik balansi tenglamasi va uning issiqlik foydali ish koeffitsiyenti (FIK) ifodasi quyidagi ko‘rinishga ega:

$$Q_{foy} = \eta_o \cdot I_{ap} \cdot A_{ap} - U_L \cdot S_\Sigma \cdot (T_{o‘rt} - T_{atr}), \quad (5)$$

$$\eta_t = Q_{foy}/(I_{ap} \cdot A_{ap}) = \eta_o - U_L \cdot (S_\Sigma/A_{ap}) \cdot (T_{o‘rt} - T_{atr})/I_{ap}. \quad (6)$$

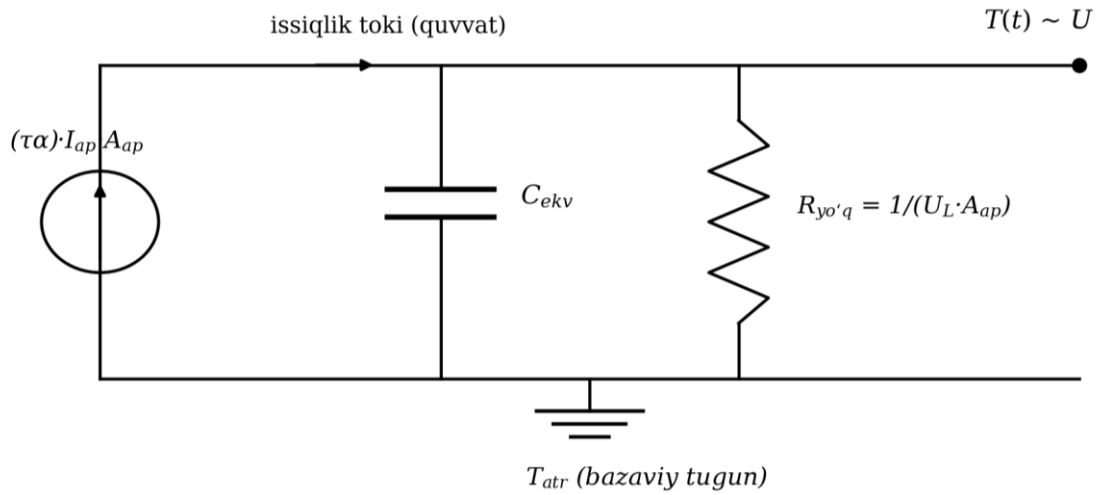
Bo‘shliq siyraklashtirilganda ichki yo‘qotishlarning konvektiv tashkil etuvchisi amalda bartaraf etilishi va radiatsion almashinuv hal qiluvchi bo‘lib qolishi aniqlangan, natijada absorber sirtiga keltirilgan hisobiy umumiy issiqlik yo‘qotish koeffitsiyenti (U_L) tizimning keltirilgan selektiv qoplamaning qoralik darajasi 0,08 da 0,93 W/(m²·K) ni (apertura yuzasi bo‘yicha 0,43 W/(m²·K)) tashkil etadi.

Kollektor dinamikasi elektr-issiqlik analogiyasi asosida tavsiflangan. Ekvivalent elektr-issiqlik RC-almashtirish sxemasi 3-rasmda keltirilgan, nostatsionar issiqlik balansi esa birinchi tartibli differensial tenglamaga keltiriladi:

$$C_{ekv} \cdot d(\Delta T)/dt + \Delta T/R_{yo‘q} = \eta_o \cdot A_{ap} \cdot I(t), \quad (7)$$

uning operatorli yechimi fizik talqin etiladigan parametrli analitik uzatish funksiyasini beradi:

$$W(p) = K/(T_s \cdot p + 1), \quad K = \eta_o \cdot A_{ap} \cdot F', \quad \text{bu yerda } T_s = C_{ekv}/(U_L \cdot A_{ap}). \quad (8)$$



3-rasm. Kollektorning ekvivalent elektr-issiqlik RC-almashtirish sxemasi

(8) ifodadan kollektor birinchi tartibli aperiodik bo‘g‘in ekanligi va chastota xossalari bo‘yicha insolyatsiyaning tez fluktuatsiyalarini silliqlaydigan past chastotali filtr sifatida ishlashi kelib chiqadi, bu esa o‘zgaruvchan bulutlilikda uning issiqlik unumdorligining barqarorligini ta’minlaydi.

Konstruktiv-rejim parametrlarini tanlash masalasi umumlashgan mezonli shartli optimallashtirish masalasi sifatida shakllantirilgan:

$$F(X) = w_1 \cdot \eta_t/\eta_{t,baz} - w_2 \cdot \Delta P/\Delta P_{baz} - w_3 \cdot m_\Sigma/m_{baz} \rightarrow \max, \quad (9)$$

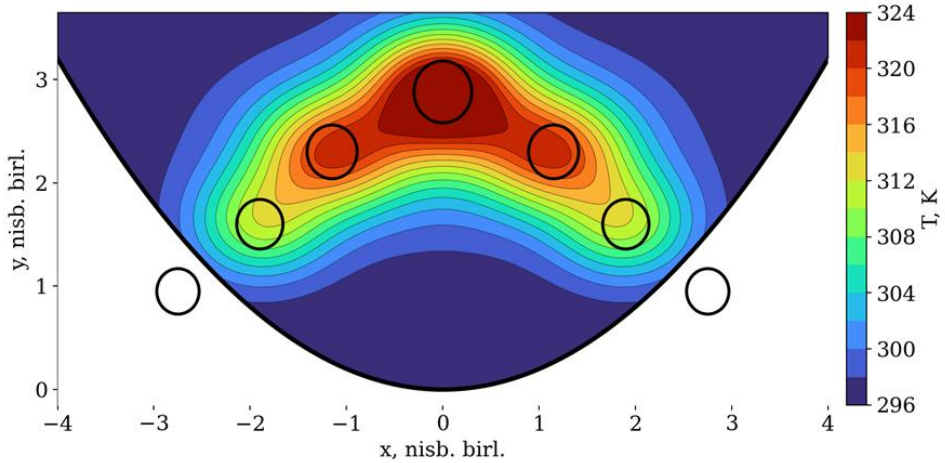
bunda issiq suv ta’minoti tizimidagi harorat diapazoni 45–90 °C, gidravlik qarshilik va qurilmaning vazn-o‘lcham ko‘rsatkichlari bo‘yicha cheklovlar qo‘yiladi.

Dissertatsiyaning uchinchi bobi **«Vakuumli fraktal quyosh kollektorining issiqlik va gidrodinamik xarakteristikalarini sonli modellashtirish va parametrik optimallashtirish»da** absorberning yassi topologiyalarida qonuniyatlarning dastlabki sonli asoslanishi bajarilgan, kollektorning radiatsion-konvektiv issiqlik almashinuvi CFD-modeli ishlab chiqilgan hamda toroidal yaruslar sonining uning energetik xarakteristikalariga ta’siri qonuniyatlari aniqlangan.

Yagona apertura yuzasi va yagona optik-konstruktiv sharoitlarda oqimli absorberning uchta topologiyasini sonli tahlil qilish natijasida issiqlik unumdorligining hal qiluvchi omili yuza bo‘ylab issiqlik olishning bir tekisligi ekanligi aniqlangan: meandr sxemasi 537 W/m² solishtirma foydali quvvat va chiqishda 68 °C haroratni ta’minlab, kollektor-quvurli sxemadan 10–11 % ga oshdi. Toroidal yaruslar kaskadi ushbu tamoyilni rivojlantirib, uni issiqlik tashuvchi harakati yo‘nalishini nurlanish taqsimoti bilan muvofiqlashtirish bilan to‘ldiradi. Shuningdek, nurlanish tushish burchagining 30° ga og‘ishi foydali quvvatni 4–6 % ga kamaytirishi, foydali quvvatning massaviy sarfga bog‘liqligi to‘yinish xarakteriga ega ekanligi, issiqlik FIK ning atrof-muhit haroratiga bog‘liqligi kichik qiyaligi esa vakuumlangan konstruksiyaning manfiy haroratlarda va 400 W/m² oqim zichligida ish qobiliyatini tasdiqlashi ko‘rsatilgan.

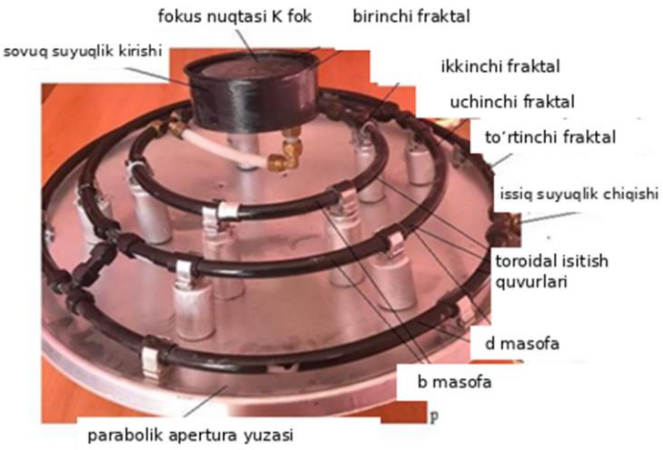
CFD-model ANSYS Fluent dasturiy kompleksida uzluksizlik, harakat va energiya tenglamalari asosida diskret ordinatalar nurlanish modeli va k–ω SST turbulentlik modelini qo‘llagan holda qurilgan. Yechimning to‘r mustaqilligi tahlili bajarilgan: bazaviy to‘rni maydalashtirishda nazorat qilinadigan kattalikning o‘zgarishi 0,1 % dan kam bo‘lishi aniqlangan.

Harorat va gidrodinamik maydonlar tahlili (4-rasm) orqali qurilma ishining fizik qonuniyatlari: absorber elementlarida nur oqimining fokal zonada maksimumi bilan 1000–2800 W/m² diapazonida mujassamlashishi, yaruslararo radiatsion almashinuv bilan harorat maydonining qisman tekislanishi, harorat gradiyentlarining quvurlarning nurlanadigan tomonida lokallashuvi va egri kanallardagi ikkilamchi oqimlar bilan silliqlanishi hamda toroidal elementlar ortidagi uyurmali zonalar bilan ko‘chirishning intensivlashuvi aniqlangan.



4-rasm. CFD-modellashtirish natijalari bo‘yicha kollektor vakuumlangan bo‘shlig‘ining o‘q kesimida harorat maydonining taqsimoti

Fraktal-toroidal batareyaning konstruktiv tuzilmasi hamda buriluvchan ramaga o‘rnatilgan fraktal quyosh kollektori tajriba namunasining umumiy ko‘rinishi mos ravishda 5- va 6-rasmlarda keltirilgan.

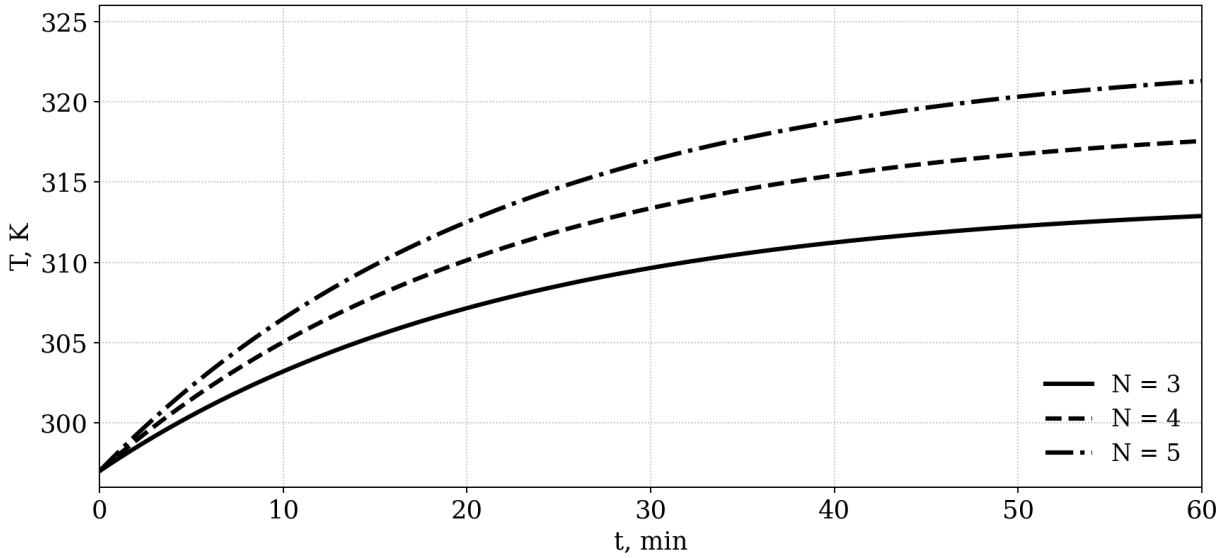


5-rasm. Vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektorining toroidal absorberlar batareyasi



6-rasm. Fraktal quyosh kollektorining umumiy ko‘rinishi

Toroidal qatorlar sonining ta’siri miqdoriy aniqlangan (7-rasm): uch qatorli konfiguratsiyadan besh qatorliga o‘tishda tizimning harorat darajasi 314 K dan 323 K gacha, foydali quvvat taxminan 1,5 baravar, integral FIK 80 % gacha ortadi, bunda gidravlik yo‘qotishlar ilgarilab o‘suvchi sur’atlarda ortadi, har bir keyingi qatordan olinadigan o‘sish esa kamayib boradi, bu yaruslar sonini tanlashning kompromiss xarakterini belgilaydi.



7-rasm. Toroidal qatorlar sonining kollektor xarakteristikalariga ta’siri

(9) ni mezonlar bo‘yicha konvolyutsion tahlillash asosida muhandislik tanlovi bajarilgan: bazaviy sifatida yaruslari oltin kesim bo‘yicha joylashtirilgan, $\alpha \geq 0{,}93$ va $\varepsilon \leq 0{,}08$ selektiv qoplamali, 45° og‘ish burchakli va issiqlik tashuvchi tezligi 0,3 m/s bo‘lgan besh qatorli konfiguratsiya tavsiya etilgan.

Dissertatsiyaning to‘rtinchi bobi **«Vakuumli fraktal quyosh suv isitish kollektorining eksperimental tadqiqotlari, modellarni verifikatsiyalash va energetik samaradorligini baholash»**da tajriba namunasi, o‘lchash tizimi, tabiiy tadqiqotlar dasturi va metodikasi tavsiflangan, harorat rejimlari, issiqlik unumdorligi va

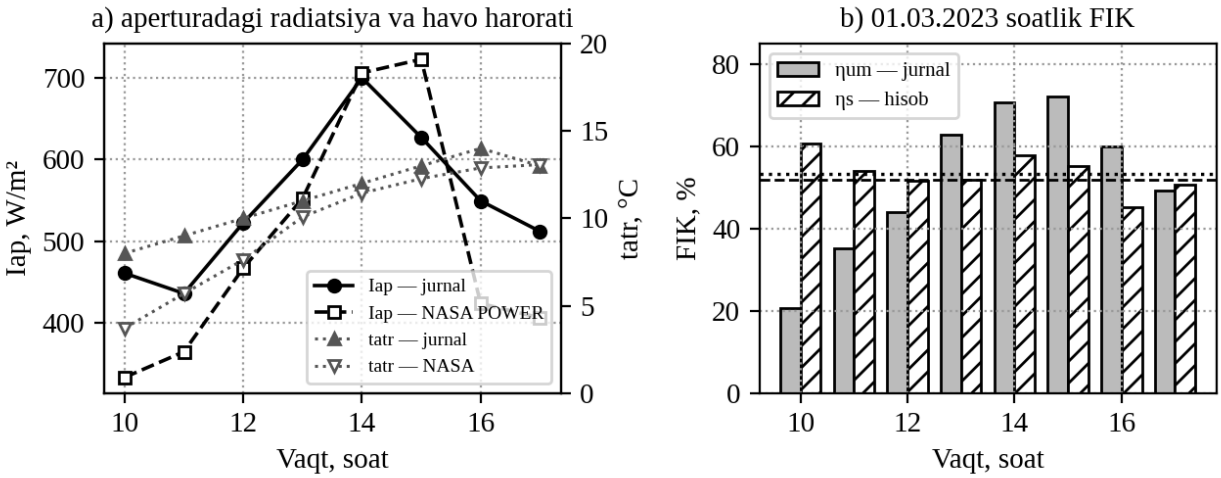
issiqlik yo‘qotishlari tadqiqoti natijalari, noaniqlik, takrorlanuvchanlik va qayta tiklanuvchanlikni baholash, ishlab chiqilgan modellarni verifikatsiyalash hamda energetik samaradorlikni qiyosiy baholash keltirilgan.

VFQSIK tajriba namunasining (apertura 0,54 m², selektiv qoplamali po‘lat quvurlardan yasalgan uchta toroidal yarus, ikki o‘qli kuzatish) tabiiy sinovlari 2023-yil 1-martda Turkiston shahridagi ochiq maydonchada hajmi 20 l bo‘lgan akkumulyator baki bilan yopiq konturda, suvning boshlang‘ich harorati 18 °C bo‘lganda o‘tkazildi. Eksperimental bazani sinov jurnali (gorizontal yuza va apertura tekisligidagi radiatsiya, havo harorati, soatlik FIK) hamda 2023-yil 1–3-mart uchun NASA POWER soatlik arxivi tashkil etdi, arxiv ikki bulutli kunni o‘z ichiga olgan uzluksiz uch sutkalik siklni hisoblash uchun nazorat qatori sifatida qabul qilindi. Natijalarga ishlov berish ikkinchi bobning issiqlik balansi tenglamalari asosida qurilgan «kollektor — bak» tizimining hisobiy modeli bo‘yicha bajarildi. Integral FIK akkumulyator bakining issiqlik balansi bo‘yicha aniqlandi, bu kollektordagi kichik harorat farqlarini o‘lchash xatoligining ta’sirini kamaytiradi.

Yilning o‘tish davridagi ochiq kunda apertura tekisligidagi oqim zichligi 723 W/m² gacha va tashqi havo harorati 0–13 °C bo‘lganda bakdagi suv 64,8 °C gacha isishi, integral FIK 53,6 % ni, solishtirma sutkalik ishlab chiqarish 2,18 kW·h/m² ni, maksimal solishtirma foydali quvvat 408 W/m² ni tashkil etishi aniqlandi. 57 soatlik uzluksiz sikl davomida foydali energiya o‘rtacha vaznli FIK 46,4 % da 2,13 kW·h ga teng bo‘ldi, bak harorati esa birinchi kundan keyin 45 °C dan yuqori saqlanib qoldi. Vakuumlashning asosiy samarasi eksperimental-hisobiy yo‘l bilan tasdiqlandi: keltirilgan issiqlik yo‘qotish koeffitsiyenti U_L = 0,43 W/(m²·K) ni tashkil etdi, bu vakuum buzilgan holatdagidan 4,2 baravar va noselektiv yuzali vakuumlanmagan ijrodagidan 10 baravar kam, shu sababli soatlik FIK harorat darajasiga kuchsiz bog‘liq.

GUM bo‘yicha noaniqlikni baholash bak balansi bo‘yicha aniqlanadigan integral FIK ning kengaytirilgan noaniqligi 7,1 % (k = 2) ni tashkil etishini, kollektordagi harorat farqi bo‘yicha soatlik qiymatlarning noaniqligi esa 37–76 % ga yetishini ko‘rsatdi. O‘lchashlarning takrorlanuvchanligi takroriy seriyalarning 0,86–0,99 korrelyatsiya koeffitsiyentlari bilan, qayta tiklanuvchanlik esa aperturadagi energiya 2,2 baravar kamayganda integral FIK ning 40–54 % darajasida saqlanishi bilan tasdiqlandi.

Verifikatsiya natijalari 8-rasmda keltirilgan. NASA POWER arxiv qatori o‘lchangan kattaliklarni aperturadagi radiatsiya bo‘yicha 0,93 va havo harorati bo‘yicha 0,98 korrelyatsiya koeffitsiyentlari bilan, radiatsiyani 10 % ga tizimli kamaytirgan holda takrorlaydi. Hisobiy model bo‘yicha 10:00–17:00 oralig‘idagi o‘rtacha FIK (53,4 %) sinov jurnali (51,8 %) bilan noaniqlik chegarasida, sutkalik foydali energiya 11 % chegarasida mos keladi, $I_{ap} \approx 700$ W/m² da nur yutuvchi tizim harorati esa uchinchi bobdagi CFD-hisob (314 K) bilan 96 % darajada mos tushadi. Dinamik RC-modelning parametrlari identifikatsiyalandi: $\eta_{o,ef}$ = 0,569, U_L = 0,73 W/(m²·K), C_{ekv} = 3951 J/K, T_s ≈ 166 min.

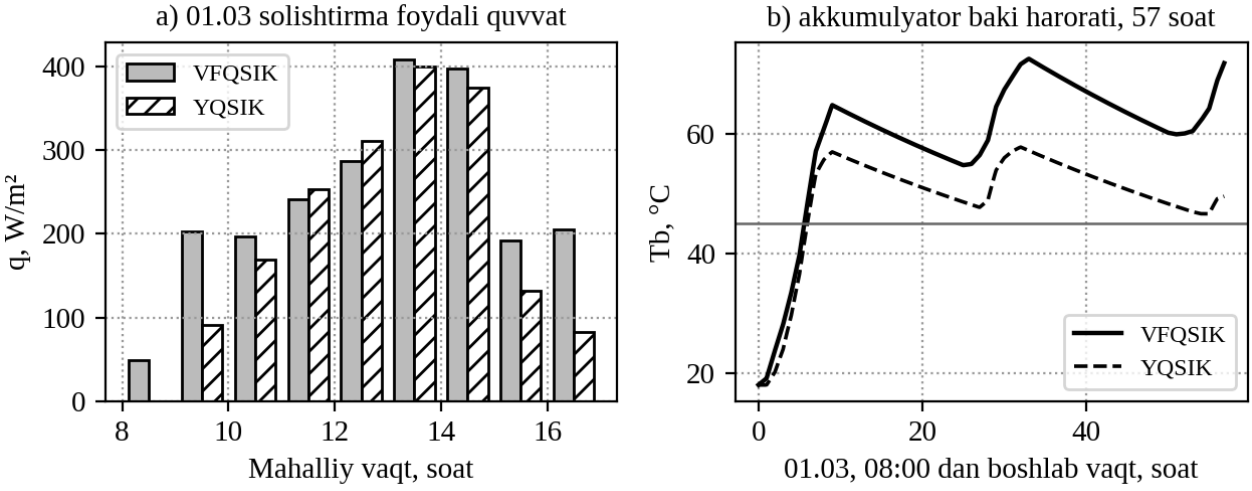


8-rasm. 01.03.2023 tabiiy sinov ma’lumotlari bo‘yicha verifikatsiya natijalari: a) jurnal va NASA POWER bo‘yicha apertura tekisligidagi oqim zichligi va havo harorati; b) jurnal va hisobiy model bo‘yicha soatlik FIK (chiziqlar — o‘rtacha qiymatlar).

Xuddi shu apertura yuzali YQSIK bilan qiyosiy baholash bir xil bak, sarf, boshlang‘ich harorat va bir xil meteoma’lumotlar qatorida issiqlik FIK ning chiziqli xarakteristikalari bo‘yicha bajarildi:

$$\eta_{VFQSIK} = 56{,}9 - 73\cdot x, \quad \eta_{YQSIK} = 75 - 450\cdot x, \quad x = (T_{o'rt} - t_{atr})/I_{ap}. \qquad (10)$$

(10) ifodadan bo‘shliqni vakuumlash va selektiv qoplama bilan bog‘liq ishlab chiqilgan qurilma xarakteristikasining olti baravar kichik og‘ishi kelib chiqadi. Taqqoslash natijalariga ko‘ra (9-rasm, 1-jadval) VFQSIK yassi selektiv kollektordan foydali energiya bo‘yicha ochiq kunda 20 % ga va uch sutkalik siklda 53 % ga ustun bo‘lib, o‘rtacha vaznli FIK 46,4 % ni (YQSIK da 31,1 %) va ochiq kun oqshomida bak haroratini 64,8 °C ni (YQSIK da 57,0 °C) ta’minlaydi. Bunda YQSIK ikkinchi tundan keyin 45 °C chegarasini saqlab qola olmaydi, VFQSIK esa uch kun davomida issiq suv olishni ta’minlaydi: quyosh rejimida 45 °C da 40 l, 300 W zaxira kechki qo‘shimcha isitish bilan quyosh energiyasi ulushi 82–90 % bo‘lganda 45–60 l.



9-rasm. Bir xil sharoitlarda VFQSIK va YQSIK ni qiyosiy baholash: a) 2023-yil 1-mart soatlari bo‘yicha solishtirma foydali quvvat; b) 57 soatlik uzluksiz siklda akkumulyator baki harorati.

1-jadval

2023-yil 1–3-mart uchun VFQSIK va YQSIK ning qiyosiy ko‘rsatkichlari

Ko‘rsatkich	VFQSIK	YQSIK
57 soat davomida qabul qilgich tekisligidagi energiya, kW·h	4,586	4,472
57 soat davomida foydali energiya, kW·h	2,130	1,389
01.03 ochiq kundagi foydali energiya, kW·h	1,177	0,981
Maksimal solishtirma quvvat, W/m²	408	400
57 soat uchun o‘rtacha vaznli issiqlik FIK, %	46,4	31,1
01.03 soat 17:00 dagi / maksimal bak harorati, °C	64,8 / 72,6	57,0 / 57,8
Keltirilgan yo‘qotish koeffitsiyenti U_L, W/(m²·K)	0,43	4,5

Ish natijalari bo‘yicha kollektorni issiq suv ta’minoti tizimlarida loyihalash va qo‘llash bo‘yicha tavsiyalar shakllantirildi: aperturasi 0,54 m² bo‘lgan bitta modulga bakning 20 l ish hajmi, issiqlik tashuvchi sarfi 0,012–0,024 kg/s, 45 °C da 5–10 l porsiyali suv olish, kechki soatlarda 300 W zaxira qo‘shimcha isitish, shuningdek selektiv qoplama va vakuumni saqlash hamda ularning holatini nazorat qilish talablari, ularning yo‘qotilishi FIK ni 25–40 % ga kamaytiradi.

XULOSA

Dissertatsiyada bajarilgan tadqiqotlar natijalari asosida qo‘yilgan vazifalarni hal etish bo‘yicha quyidagi asosiy xulosalar shakllantirildi:

1. Parabolik aperturali va vakuumlangan bo‘shliqda toroidal absorberlari iyerarxik (fraktal) joylashtirilgan VFQSIKning takomillashtirilgan konstruksiyasi ishlab chiqildi. Uning farqli jihati issiqlik tashuvchining konsentratsiyalangan nur oqimi zichligi taqsimotiga muvofiqlashtirilgan holda «periferiyadan fokusga» yo‘nalishda kaskadli-yarusli isitilishi bo‘lib, yaruslarni oltin kesim qonuni bo‘yicha masshtablash ilk bor funksional jihatdan asoslab berildi. Natijada qo‘shni yaruslar radiuslarining $R(L+1)/R(L) = \varphi \approx 1{,}618$ nisbati ularning o‘zaro soyalanmaslik shartidan ($\varphi^2 = \varphi + 1$ xossasi) kelib chiqishi va strukturaning masshtab invariantligini ta’minlashi aniqlandi.

2. Quyosh radiatsiyasining kollektorning konsentratsiyalovchi va nur yutuvchi tizimi bilan optik-radiatsion o‘zaro ta’siri hamda uning elementlari issiqlik balansining dastlabki matematik tenglamalar tizimi asoslandi va olindi. Bu tizimda vakuumlangan bo‘shliqdagi issiqlik yo‘qotishlarining konvektiv, radiatsion va konduktiv tashkil etuvchilari alohida hisobga olinadi. Natijada bo‘shliq siyraklashtirilganda ichki yo‘qotishlarning konvektiv tashkil etuvchisi amalda bartaraf etilishi va radiatsion almashinuv hal qiluvchi bo‘lib qolishi aniqlandi. Shu sababli absorber yuzasiga keltirilgan hisobiy umumiy issiqlik yo‘qotish koeffitsiyenti selektiv qoplamaning qoralik darajasi 0,08 bo‘lganda 0,93 W/(m²·K) ni (apertura yuzasi bo‘yicha 0,43 W/(m²·K)), traktning to‘g‘ri nurlanish bo‘yicha optik samaradorligi esa shishaning o‘tkazish koeffitsiyenti 0,90, konsentratorning qaytarish koeffitsiyenti 0,90 va selektiv qoplamaning yutish koeffitsiyenti 0,93 bo‘lganda 0,702 ni tashkil etadi.

3. VFQSIK uchun ilk bor elementlarning ekvivalent issiqlik qarshiliklari va yig‘indi issiqlik sig‘imlarini kiritish orqali elektr-issiqlik analogiyasiga asoslangan va operator ko‘rinishiga keltirilgan dinamik matematik model ishlab chiqildi. Natijada fizik ma’noga ega bo‘lgan $K = \eta_o \cdot A_{ap} \cdot F'$ kuchaytirish koeffitsiyenti va $T = C_{ekv}/(U_L \cdot A_{ap})$ vaqt doimiysiga ega birinchi tartibli $W(p) = K/(T \cdot p + 1)$ analitik uzatish funksiyasi olindi. U o‘tkinchi jarayonlarni hamda foydali issiqlik quvvatining konstruktiv parametrlarga sezgirligini hisoblash imkonini beradi. Natijada kollektor insolyatsiyaning qisqa muddatli tebranishlarini silliqlovchi past chastotali filtr kabi ishlashi aniqlandi, bu esa o‘zgaruvchan bulutlilik sharoitida issiqlik unumdorligining barqarorligini ta’minlaydi.

4. Bir xil apertura yuzasi va yagona optik-konstruktiv shartlarda sonli modellashtirish yo‘li bilan oqimli absorber topologiyasi, oriyentatsiya va rejim parametrlarining QSIK issiqlik unumdorligiga ta’siri qonuniyatlari aniqlandi. Natijada hal qiluvchi omil issiqlikning yuza bo‘ylab bir tekis olinishi ekanligi ko‘rsatildi. Bunda meandr sxemasi 800 W/m² atrofidagi insolyatsiyada 537 W/m² solishtirma foydali quvvat va chiqishda 68 °C haroratni ta’minlab, kollektor-quvurli sxemadan 10–11 % ga ustun keladi. Shu bilan birga nurlanish tushish burchagining 30° ga og‘ishi barcha topologiyalar uchun foydali quvvatni 4–6 % ga kamaytiradi. Issiqlik FIKning tushish burchagi va atrof-muhit haroratiga, foydali quvvatning radiatsiya oqimi zichligi va massaviy sarfga bog‘liqliklari olindi, ular rejim parametrlarining ratsional sohasini belgilaydi.

5. ANSYS Fluent dasturiy kompleksida diskret ordinatalar nurlanish modelini k–ω SST turbulentlik modeli bilan birgalikda qo‘llab hamda yechimning to‘rga bog‘liq emasligi tahlilini bajarib (bazaviy to‘r maydalashtirilganda nazorat kattaligining o‘zgarishi 0,1 % dan kam), VFQSIKda radiatsion-konvektiv issiqlik almashinuvining uch o‘lchamli CFD-modeli ishlab chiqildi va verifikatsiyalandi. Natijada qurilma ishining fizik qonuniyatlari, jumladan absorber elementlarida nur oqimining fokal zonada maksimumga ega 1000–2800 W/m² konsentratsiyasi, harorat maydonining yaruslararo radiatsion almashinuv hisobiga qisman tekislanishi va toroidal elementlar ortidagi uyurmali zonalar orqali ko‘chirishning jadallashuvi aniqlandi hamda yaruslar sonining ta’siri miqdoriy baholandi. Uch qatordan besh qatorga o‘tilganda tizimning harorat darajasi 314 K dan 323 K gacha, foydali quvvat taxminan 1,5 baravar, integral FIK 70 % dan 80 % gacha ortadi, gidravlik yo‘qotishlar esa 3 baravar ilgarilab o‘sadi. Shu asosda umumlashgan mezon bo‘yicha ratsional besh qatorli konfiguratsiya asoslandi.

6. Yilning o‘tish (sovuq) davri iqlim sharoitida kollektor tajriba namunasining tabiiy sinovlari o‘lchash noaniqligini baholash va ishlab chiqilgan modellarni verifikatsiyalash bilan o‘tkazildi. Natijada maksimal solishtirma foydali quvvat 408 W/m² ni, sutkalik ishlab chiqarish apertura yuzasining 1 m² iga 2,18 kW·h ni, integral issiqlik FIK ochiq kunda 53,6 % ni va ikki bulutli kunni o‘z ichiga olgan uch sutkalik siklda 46,4 % ni tashkil etishi ko‘rsatildi. Bunda akkumulyator bakidagi suv 18 dan

64,8 °C gacha isiydi, keltirilgan issiqlik yo‘qotish koeffitsiyenti esa 0,43 W/(m²·K) ga teng.

7. Ishlab chiqilgan kollektorning issiq suv ta’minoti tizimlari uchun energetik samaradorligi va amaliy yaroqliligi aniqlandi hamda uni loyihalash va qo‘llash bo‘yicha tavsiyalar ishlab chiqildi. Natijada bir xil apertura yuzasi va bir xil tashqi sharoitlarda vakuumlangan fraktal kollektor yassi selektiv quyosh suv isitgichi kollektoridan foydali energiya bo‘yicha ochiq kunda 20 % ga va o‘tish davrining uch sutkalik siklida 53 % ga ustun kelib, 31,1 % o‘rniga 46,4 % o‘rtacha vaznli issiqlik FIKni hamda ochiq kun oqshomida 57,0 °C o‘rniga 64,8 °C bak haroratini ta’minlashi ko‘rsatildi.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/2025.27.12.T.19.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФЕРГАНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
МЕЖДУНАРОДНЫЙ КАЗАХСКО-ТУРЕЦКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ХОДЖИ АХМЕДА ЯСАВИ

КИБИШОВ АДЫЛХАН ТАЛГАТОВИЧ

РАЗРАБОТКА ВАКУУМНОГО ФРАКТАЛЬНОГО СОЛНЕЧНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРНОГО УСТРОЙСТВА

05.05.06 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ

ФЕРГАНА – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № B2023.4.PhD/T4243.

Диссертация выполнена в Ферганском государственном техническом университете и Международном казахско-турецком университете имени Ходжи Ахмеда Ясави.

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

Научный руководитель:	**Авезова Нилуфар Раббанакуловна** доктор технических наук, старший научный сотрудник
Официальные оппоненты:	**Матчанов Нураддин Азадович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник
	Вохидов Акмал Улашевич, доктор философии (PhD) по техническим наукам
Ведущая организация:	Ошский технологический университет (Республика Киргизстан)

Защита состоится «28» 11 2026 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета PhD.03/2025.27.12.T.19.01 при Ферганском государственном техническом университете. (Адрес: 150100, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел.: (+99873) 241-12-06, факс: (+99873) 241-12-06, e-mail: ilmiy-kengash@ferpi.uz, малый зал заседания).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ферганского государственного технического университета (зарегистрирована за № 357). Адрес: 150100, г. Фергана, ул. Ферганская, дом 86. Тел: (+99873) 241-12-06.

Автореферат диссертации разослан «10» 11 2026 года.
(протокол рассылки № 6 от «10» 11 2026 г.)

У.Р. Саломов
Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, д.т.н., проф.

А.А. Кучкаров
Ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, PhD, доцент

Л.К. Мамадалиева
Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.т.н., проф.

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность диссертационной темы. В мире, в условиях развития децентрализованных систем теплоснабжения, повышается интерес к применению солнечных водонагревательных коллекторов, использующих возобновляемую энергию солнечного излучения. Учитывая, что солнечные водонагревательные установки обеспечивают надёжное и устойчивое покрытие нагрузки горячего водоснабжения без расхода органического топлива, особенно в составе автономных систем малой мощности, такие системы находят широкое применение в различных отраслях. С точки зрения того факта, что суммарная установленная тепловая мощность солнечных водонагревательных коллекторов в мире превысила 500 ГВт при среднегодовом темпе роста порядка 13 %[1], такие энергетические установки на возобновляемых источниках являются эффективным решением для повышения энергоэффективности. При этом, разработка вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллекторного устройства, сохраняющего теплопроизводительность при низкой инсоляции и отрицательных температурах окружающей среды, считается актуальным.

В мире проводятся научные исследования, направленные на повышение эффективности солнечных водонагревательных коллекторов за счёт вакуумирования корпуса, оптической концентрации излучения и усложнения геометрии лучепоглощающего абсорбера. При этом особое внимание уделяется разработке и оптимизации конструктивно-режимных параметров таких устройств с целью обеспечения устойчивой выработки тепловой энергии в условиях пониженной плотности потока солнечной радиации и переменной облачности[2]. Кроме того, особое внимание уделяется численному моделированию радиационно-конвективного теплообмена в вакуумированных полостях и экспериментальной верификации расчётных моделей в натурных климатических условиях.

В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы поставлены задачи, в том числе «..бесперебойное обеспечение экономики электроэнергией, активное внедрение технологий «Зелёной экономики» во все сферы, увеличение энергоэффективности экономики на 20 процентов». Для выполнения поставленных задач, в частности, строительство новых и модернизация существующих производств на основе возобновляемых источников энергии, в том числе разработка и усовершенствование конструкции фрактальных солнечных водонагревательных коллекторов, обеспечение его устойчивой теплопроизводительности при низких значениях солнечной инсоляции и отрицательных температурах окружающей среды, а также разработка методов расчёта их основных теплотехнических

[1] Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends. Detailed Market Figures. – IEA Solar Heating & Cooling Programme.

[2] Barone G., Buonomano A., Kalogirou S.A., Ktistis P.K., Palombo A. A holistic methodology for designing novel flat plate evacuated solar thermal collectors: Modelling and experimental assessment // Renewable Energy, 2024, Vol. 232, 120967. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120967

характеристик, важно проводить научные исследования, направленные на решение этих вопросов, являющиеся востребованными.

Представленное диссертационное исследование, в определенной мере, способствует выполнению задач, изложенных в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», а также постановлениями Президента Республики Узбекистан № ПП-4779 «О дополнительных мерах по сокращению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетической продукции, путем повышения энергоэффективности экономики и задействования имеющихся ресурсов» от 10 июля 2020 года и № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии» от 22 августа 2019 года, в котором утверждены долгосрочные целевые параметры развития ВИЭ и план организационно-практических мер дальнейшего развития ВИЭ.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан IV–«Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологии, фотоники и других передовых технологий», а также согласно «Концепции развития высшего образования и науки в Республике Казахстан на 2023-2029 годы»**.**

Степень изученности проблемы. Вопросами повышения тепловой эффективности и надёжности солнечных водонагревательных коллекторов, включая вакуумированные и концентрирующие конструкции, за рубежом занимались J.A. Duffie, W.A. Beckman, S.A. Kalogirou, W. Zima, A.A. Hachicha, A. Mwesigye, B. Zou, Z. Tian, G. Barone, A. Buonomano, S.K. Verma, E. Vengadesan, R. Senthil, Y. Liu, J. Zheng и др. Кроме того, значительный вклад в развитие данной области внесли F.R. Menter, P.J. Roache, M. Fatouh, S. Akbarzadeh, M.S. Valipour, J. Mahakud и B. Kundu, работы которых направлены на построение моделей радиационного и турбулентного теплообмена в приёмниках солнечных коллекторов, верификацию численных решений и оптимизацию геометрии абсорберов. Результаты их исследований легли в основу современных подходов к расчётному проектированию и численному моделированию солнечных тепловых устройств.

Среди казахских исследователей следует отметить Н.Т. Рустамова, А.Т. Мейрбекова, М. Кунелбаева, Т. Merembayev, А.Е. Байболова, П.А. Нестеренкова и других учёных, внёсших существенный вклад в развитие теоретических и прикладных аспектов создания и совершенствования солнечных водонагревательных установок. Их работы направлены на повышение тепловой эффективности коллекторов, снижение их тепловых потерь и разработку фрактальных компоновок лучепоглощающих элементов, защищённых охранными документами Республики Казахстан.

В Узбекистане вопросы теплового преобразования солнечной энергии и повышения эффективности солнечных водонагревательных коллекторов также являются приоритетным направлением исследований. Значительный вклад в данную область внесли Р.Р. Авезов, Н.Р. Авезова, А.У. Вохидов, Ю.К. Рашидов, М.А. Маматкосимов, С.А. Орлов, А.А. Кучкаров, Э.Ю. Рахимов, которые занимаются вопросами определения коэффициента тепловых потерь лучепоглощающих панелей, моделирования процессов теплового преобразования солнечной энергии в плоских коллекторах и оптимизации их конструктивно-режимных параметров. Их исследования способствуют практическому применению солнечных водонагревательных технологий в системах горячего водоснабжения жилых, коммунально-бытовых и промышленных объектов Узбекистана.

Таким образом, проведённый обзор научных источников показывает, что несмотря на значительный прогресс в области вакуумированных и концентрирующих солнечных водонагревательных коллекторов, остаются нерешённые задачи, связанные с обоснованием закона размещения лучепоглощающих элементов в вакуумированной полости, описанием динамики теплопроизводительности при переменной инсоляции и комплексной экспериментально-численной верификацией фрактальных конструкций, что определяет актуальность дальнейших исследований в данном направлении.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планами научно-исследовательских работ по научному направлению «Возобновляемые источники энергии», предусмотренными программами научно-исследовательских работ кафедры «Электроинженерия» факультета Инженерии Международного Казахско-Турецкого университета имени Ходжи Ахмеда Ясави, кафедры «Электроники и приборостроения» факультета «Энергетика» Ферганского государственного технического университета и в рамках фундаментального проекта ФЗ-2020100661 “Теоретико-вычислительные и прикладные исследования комбинированных систем накопления и преобразования энергии для обоснования оптималных конфигураций автономных фотоэлектрических станций для энергоснабжения потребителей в различных природно-климатических регионах Узбекистана” (2021-2025).

Целью исследования является совершенствование конструкции вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллектора, обеспечение его устойчивой теплопроизводительности при низких значениях солнечной инсоляции и отрицательных температурах окружающей среды, а также разработка методов расчёта теплотехнических характеристик коллектора.

Для достижения данной цели сформированы следующие задачи исследования:

критический анализ современного состояния и тенденций развития солнечных систем горячего водоснабжения, конструкций плоских, вакуумных, концентрирующих и фрактальных коллекторов и охранных документов с определением научного пробела и разработка на этой основе усовершенствованной конструкции вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллектора;

разработка математической модели теплового баланса и динамической модели коллектора на основе электротепловой аналогии с использованием аппарата передаточных функций, позволяющей рассчитывать переходные процессы и формировать критерии оптимизации конструктивно-режимных параметров;

разработка CFD-модели радиационно-конвективного теплообмена коллектора, установление закономерностей влияния числа и геометрии тороидальных ярусов, ориентации и режимных параметров на энергетические характеристики и обоснование рациональной конфигурации устройства;

экспериментальные исследования опытного образца коллектора в натурных условиях с оценкой неопределённости измерений, верификацией разработанных моделей и сравнительной оценкой энергетической эффективности относительно плоского солнечного водонагревательного коллектора.

Объектом исследования является вакуумированное фрактальное солнечное водонагревательное коллекторное устройство с параболической апертурой и тороидальной батареей абсорберов для систем горячего водоснабжения.

Предметом исследования являются процессы теплового преобразования солнечной энергии и радиационно-конвективного теплообмена в вакуумированной полости рассматриваемого коллектора, включая методы оценки его теплотехнических характеристик и эффективность выработки тепловой энергии, а также факторы, влияющие на общий КПД устройства.

Методы исследования. В ходе выполнения работы использовались методы системного анализа, методы теоретических основ теплотехники и теории теплопередачи, методы теории термодинамики, методы вычислительной гидродинамики и радиационного теплообмена в программной среде ANSYS Fluent, теория передаточной функции, а также методы натурного эксперимента с оценкой неопределённости измерений.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана усовершенствованная конструкция вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллектора на основе иерархического размещения тороидальных абсорберов по закону золотого сечения в вакуумированной полости с параболической апертурой, позволяющая исключить взаимное затенение ярусов и обеспечить масштабную инвариантность лучепоглощающей структуры;

разработана динамическая математическая модель коллектора, позволяющая рассчитывать переходные процессы с помощью аналитической

передаточной функции первого порядка и обеспечивающая устойчивость теплопроизводительности при переменной облачности за счёт свойств фильтра нижних частот;

усовершенствована методика расчёта энергетических характеристик коллектора на основе CFD-моделирования радиационно-конвективного теплообмена с учётом межъярусного радиационного обмена и вторичных течений в криволинейных каналах;

разработано энергоэффективное вакуумированное фрактальное солнечное водонагревательное коллекторное устройство с селективным покрытием, позволяющее за счёт вакуумирования полости сократить тепловые потери и повысить средневзвешенный тепловой КПД до 66,0 %.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан и создан экономически выгодный и устойчивый для автономного горячего водоснабжения удалённых потребителей экспериментальный образец вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллектора[3], обеспечивающий нагрев воды до 64,1 °С и суточную выработку 2,81 кВт·ч на 1 м² апертуры при средней инсоляции до 529 Вт/м²;

расчётно-экспериментальным путём обосновано, что размещение тороидальных ярусов по золотому сечению в сочетании с вакуумированием полости позволяет довести средневзвешенный тепловой КПД коллектора до 66,0 % и сократить тепловые потери до 4,4 % поступившей на апертуру энергии.

Достоверность результатов исследований объясняется взаимосвязью оптико-радиационных, теплотехнических и энергетических показателей вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллектора, соответствием расчётных результатов данным экспериментальных испытаний (расхождение 1,41 % для динамической модели и 1,35 % для CFD-модели по суточному ходу температур при расширенной неопределённости определения теплового КПД 5,5 % и коэффициенте охвата k = 2), а также тем, что полученные результаты не противоречат основным законам термодинамики.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в развитии теории расчёта вакуумированных фрактальных солнечных водонагревательных коллекторов, а также в разработке математической модели, позволяющей оценивать влияние закона размещения тороидальных ярусов, их числа, оптических характеристик поверхностей и режима движения теплоносителя на эффективность системы.

Практическая значимость результатов исследования определяется разработкой вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллекторного устройства, включающего параболическую апертуру, тороидальную батарею абсорберов, вакуумированную полость и бак-аккумулятор. Применение данной установки

[3] Вакуумный фрактальный солнечный коллектор. Патент Республики Казахстан на изобретение № 36213 от 30.06.2023.

позволяет обеспечить нагрев воды до 64,1 °С в переходный период года, довести средневзвешенный тепловой КПД до 66,0 %, с замещением топливно-энергетических ресурсов на нужды горячего водоснабжения довести до 60 % в течении года.

Внедрение результатов исследования. На основе результатов, полученных по разработке вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллекторного устройства для систем горячего водоснабжения:

конструкция вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллектора, оснащённого фрактальными абсорберами, и динамическая математическая модель коллектора, обеспечивающая устойчивость его теплопроизводительности, использованы в образовательном процессе Ташкентского государственного технического университета, а также при выполнении фундаментального проекта F-OT-2021-497 (справка Центра исследований развития высшего образования Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан № 02/01-01-365 от 23 сентября 2025 года). В результате создана возможность моделирования теплового контура и разработки опытного образца гибридной фотоэлектрической тепловой установки;

вакуумный фрактальный солнечный водонагревательный коллектор (IAP36213) внедрён на объекте АО «Кентауский трансформаторный завод» (справка АО «Кентауский трансформаторный завод» Республики Казахстан № 1 от 25 апреля 2025 года). В результате достигнута экономия топливно-энергетических ресурсов, используемых для нужд горячего водоснабжения в холодный период года, почти на 60 %.

Апробация результатов исследования. Основные результаты данного исследования были доложены и обсуждены на 4 международных научно-практических конференциях, проведённых в Республике Казахстан и Узбекистан.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 9 научных статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан и Республики Казахстан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, в том числе 2 статьи в зарубежных (реферируемых в базе данных Scopus Q1 и Q2), а также получен 1 патент на изобретения Республики Казахстан.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Диссертация составляет 120 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, отмечено соответствие исследования основным приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике, приведены результаты

анализа по степени изученности искомой научной проблемы, сформулированы цель и задачи, указаны объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их научная и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Современное состояние и научно-методические основы повышения эффективности солнечных водонагревательных коллекторов»** выполнен анализ современного состояния и тенденций развития солнечных систем горячего водоснабжения в Республике Узбекистан и Республике Казахстан, проведён сравнительный анализ конструкций плоских, вакуумных, концентрирующих и фрактальных коллекторов, рассмотрены теплофизические процессы и факторы, определяющие их энергетическую эффективность, а также методы математического и численного моделирования тепловых, гидродинамических и радиационных процессов.

Установлено, что тепловая эффективность традиционных плоских солнечных водонагревательных коллекторов (ПСВК), составляющая 50–65 % при плотности потока солнечной радиации (СР) 800 Вт/м², в зимних условиях эксплуатации снижается до 30 % и ниже вследствие роста доли тепловых потерь в общем энергетическом балансе. Показано, что каждый из известных путей повышения эффективности реализует лишь часть механизмов подавления потерь: усложнение геометрии абсорбера плоских коллекторов даёт прирост тепловой эффективности на 5–24 %, однако ограничено ростом потерь при повышении рабочей температуры; вакуумирование подавляет конвективную составляющую потерь, но повышает относительную роль радиационного обмена, при котором изменение излучателной способности поверхностей способно увеличивать коэффициент тепловых потерь вакуумных конструкций на величину до 98,5 %; концентрирующие системы обеспечивают высокую плотность лучистого потока ценой утраты рассеянной составляющей радиации и необходимости слежения за Солнцем.

Анализ методов моделирования показал, что адекватное описание процессов в вакуумированном фрактальном коллекторе не обеспечивается ни одним из классов методов в отдельности и требует применения методической связки «математическая модель – CFD-анализ – анализ чувствительности – экспериментальная верификация» с корректным заданием радиационных граничных условий, обоснованием модели турбулентности, подтверждением сеточной независимости решения и верификацией по натурным данным.

Патентно-информационный анализ охранных документов Республики Узбекистан, Республики Казахстан, Российской Федерации и дальнего зарубежья за период 2018–2026 гг. выявил, что отдельные составляющие исследуемой конструкции – вакуумирование, параболическая концентрация, вторичные отражатели, пространственно развитые проточные абсорберы, селективные покрытия и слежение — широко представлены в патентном массиве, однако их интеграция в едином устройстве с иерархически (фрактально)

расположенными тороидальными теплообменными элементами практически не разработана. Прямая фрактальная постановка прослеживается лиш в базовой патентной линии KZ №2639 → KZ №36213, в рамках которой выполняется настоящее исследование. На основании выявленного научного пробела сформулированы цель и задачи диссертации.

Во второй главе **«Теоретическое обоснование конструкции и математическое моделирование вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллектора»** сформулирована физическая концепция вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллектора (ВФСВК), выполнена геометрическая параметризация фрактально-тороидальной структуры абсорбера, построены оптическая и тепловая модели, а также динамическая модель на основе электротепловой аналогии.

Принципиальная схема разработанного ВФСВК приведена на Рис. 1. Устройство объединяет в едином корпусе параболическую апертуру, концентрирующую излучение к фокальной зоне, вакуумированную полость, подавляющую конвективные потери, и батарею тороидальных абсорберов, расположенных ярусами. Теплоноситель движется каскадно «от периферии к фокусу», что согласует последовательность его нагрева с распределением плотности лучистого потока по ярусам.

Площадь и объём тороидального яруса определяются по теореме Гулдина:

$$S_L = 4 \cdot \pi^2 \cdot R_L \cdot r_L, \tag{1}$$

где R_L – радиус осевой линии яруса, r_L – радиус образующей окружности.

Закон размещения ярусов на апертуре обоснован золотым сечением: отношение радиусов смежных ярусов принимается равным $\varphi = 1{,}618$, что вытекает из условия отсутствия их взаимного затенения в силу свойства $\varphi^2 = \varphi + 1$ и обеспечивает масштабную инвариантность структуры:

$$R_L = R_1 \cdot \varphi^{(L-1)}, \qquad L = 1, 2, \ldots, N, \tag{2}$$

а суммарная площадь лучепоглощающей поверхности приемника описывается суммой геометрической прогрессии:

$$S\Sigma = \Sigma\, S_L = 4 \cdot \pi^2 \cdot \Sigma\, R_L \cdot r_L, \qquad L = 1 \ldots N. \tag{3}$$

Схема иерархического размещения ярусов на параболической апертуре приведена на Рис. 2. Для трёхъярусной батареи суммарная площадь лучепоглощающей поверхности составляет 0,251 м² при отношении к площади апертуры 0,465 и геометрическом коэффициенте концентрации 2,15.

Плотность поглощённого лучистого потока на поверхности L-го яруса определяется совместным действием прямого и отражённого от концентратора излучения:

$$qL = \alpha \cdot [\gamma_L \cdot \rho_к \cdot \tau_c \cdot I_{ап} \cdot A_{к,L} + (\tau\alpha)_{эф} \cdot I_{ап} \cdot A_{пр,L}] / S_L, \tag{4}$$

где α – коэффициент поглощения селективного покрытия, $\rho_к$ – коэффициент отражения концентратора, τ_c – коэффициент пропускания светопрозрачного покрытия, γ_L – доля потока, направляемого на L-й ярус.

Расчётная оптическая эффективность тракта составляет $\eta_o = 0{,}702$ по прямому излучению при $\tau_c = 0{,}90$, $\rho_к = 0{,}90$ и $\alpha = 0{,}93$.

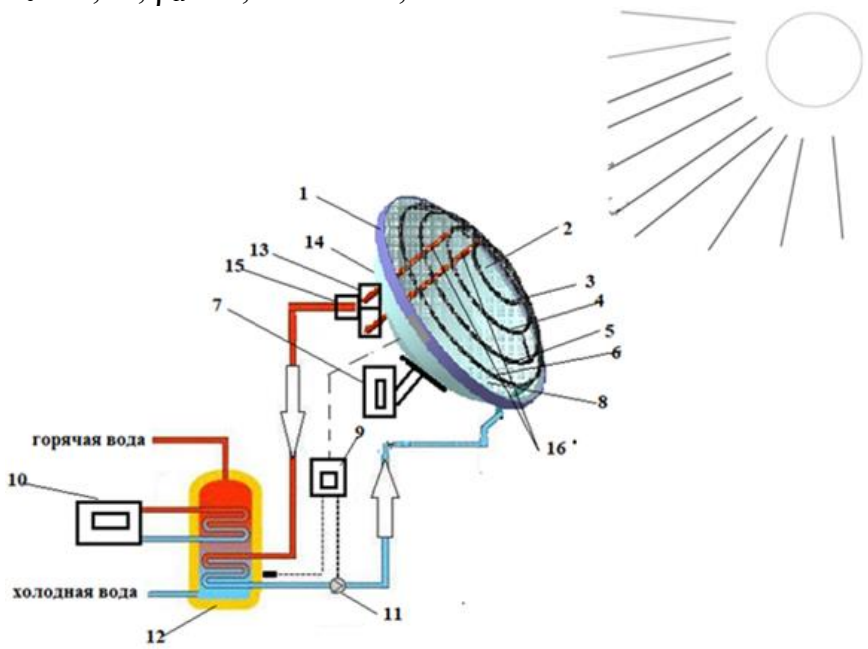


Рис. 1. Принципиальная схема вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллектора: *1 – силиконовый уплотнитель, 2 – вакуумированная поверхность из бромосиликатного стекла, 3 – первая тороидальная фракта (фокальная зона), 4, 5 – промежуточные тороидальные фрактальные трубы, 6 – крайняя тороидальная фракта (вход холодной воды), 7 – двухосный механизм слежения за Солнцем, 8 – алюминиевый абсорбер с высокоселективным покрытием, 9 – контроллер, 10 – датчик температуры, 11 – насос, 12 – теплообменник, 13 – теплораспределитель, 14 – вакуумированный параболический концентратор, 15 – узел отбора горячей воды, 16 – выход воды различной температуры.*

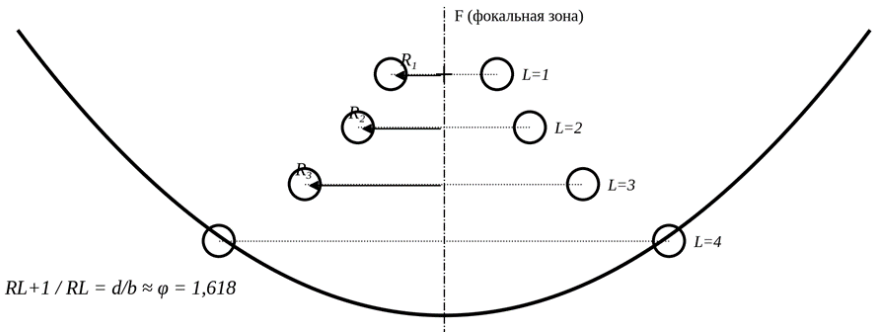


Рис. 2. Схема иерархического размещения тороидальных ярусов на параболической апертуре

Уравнение теплового баланса коллектора и выражение для его теплового КПД имеют вид:

$$Q_{пол} = \eta_o \bullet I_{ап} \bullet A_{ап} - U_L \bullet S\Sigma \bullet (T_{ср} - T_{окр}), \quad (5)$$

$$\eta_т = Q_{пол}/(I_{ап} \bullet A_{ап}) = \eta_o - U_L \bullet (S\Sigma/A_{ап}) \bullet (T_{ср} - T_{окр})/I_{ап}. \quad (6)$$

Установлено, что при разрежении полости конвективная составляющая внутренних потерь практически исключается и определяющим становится радиационный обмен, вследствие чего расчётный суммарный коэффициент

тепловых потерь, отнесённый к поверхности абсорбера, составляет 0,93 Вт/(м²·К) (0,43 Вт/(м²·К) по площади апертуры) при степени черноты селективного покрытия 0,08.

Динамика коллектора описана на основе электротепловой аналогии. Эквивалентная электротепловая RC-схема замещения приведена на Рис. 3, а нестационарный тепловой баланс сводится к дифференциальному уравнению первого порядка:

$$C_{экв} \cdot d(\Delta T)/dt + \Delta T/R_{пот} = \eta_o \cdot A_{ап} \cdot I(t), \qquad (7)$$

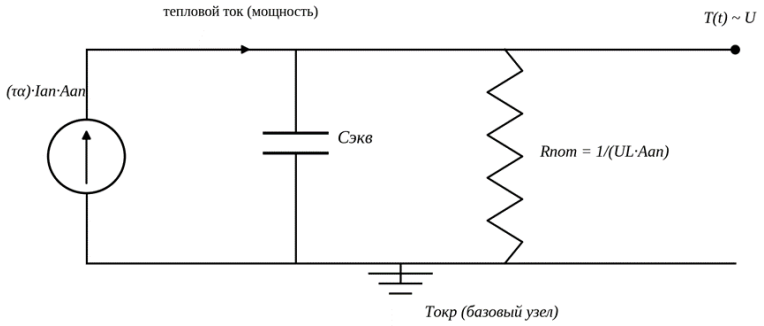


Рис. 3. Эквивалентная электротепловая RC-схема замещения коллектора

операторное решение которого даёт аналитическую передаточную функцию с физически интерпретируемыми параметрами:

$$W(p) = K/(T_c \cdot p + 1), \quad K = \eta_o \cdot A_{ап} \cdot F', \quad \text{где } T_c = C_{экв}/(U_L \cdot A_{ап}). \qquad (8)$$

Из выражения (8) следует, что коллектор является апериодическим звеном первого порядка и по частотным свойствам работает как фильтр нижних частот, сглаживающий быстрые флуктуации инсоляции, чем обеспечивается устойчивость его теплопроизводительности при переменной облачности.

Задача выбора конструктивно-режимных параметров сформулирована как задача условной оптимизации с обобщённым критерием:

$$\Phi(X) = w_1 \cdot \eta_т/\eta_{т,баз} - w_2 \cdot \Delta P/\Delta P_{баз} - w_3 \cdot m\Sigma/m_{баз} \rightarrow \max, \qquad (9)$$

при ограничениях по температурному диапазону системы горячего водоснабжения 45–90 °C, гидравлическому сопротивлению и весогабаритным показателям устройства.

В третьей главе **«Численное моделирование и параметрическая оптимизация тепловых и гидродинамических характеристик вакуумированного фрактального солнечного коллектора»** выполнено предварительное численное обоснование закономерностей на плоских топологиях абсорбера, разработана CFD-модель радиационно-конвективного теплообмена коллектора и установлены закономерности влияния числа тороидальных ярусов на его энергетические характеристики.

Численным анализом трёх топологий проточного абсорбера при единой апертурной площади и единых оптико-конструктивных условиях установлено, что определяющим фактором теплопроизводительности является равномерность отбора тепла по площади: меандровая схема обеспечила уделную полезную мощность 537 Вт/м² и температуру на выходе

68 °C, превысив коллекторно-трубчатую на 10–11 %. Каскад тороидальных ярусов развивает этот принцип, дополняя его согласованием направления движения теплоносителя с распределением облучённости. Показано также, что отклонение угла падения излучения на 30° снижает полезную мощность на 4–6 %, зависимость полезной мощности от массового расхода имеет характер насыщения, а малая крутизна зависимости теплового КПД от температуры окружающей среды подтверждает работоспособность вакуумированной конструкции при отрицательных температурах и плотности потока 400 Вт/м².

CFD-модель построена в программном комплексе ANSYS Fluent на основе уравнений неразрывности, движения и энергии с применением модели излучения дискретных ординат и модели турбулентности k–ω SST. Выполнен анализ сеточной независимости решения: изменение контролируемой величины при измельчении базовой сетки составило менее 0,1 %.

Анализом температурных и гидродинамических полей (Рис. 4) установлены физические закономерности работы устройства: концентрация лучистого потока на элементах абсорбера в диапазоне 1000–2800 Вт/м² с максимумом в фокалной зоне, частичное выравнивание температурного поля межъярусным радиационным обменом, локализация температурных градиентов на облучаемой стороне труб со сглаживанием вторичными течениями в криволинейных каналах и интенсификация переноса вихревыми зонами за тороидальными элементами.

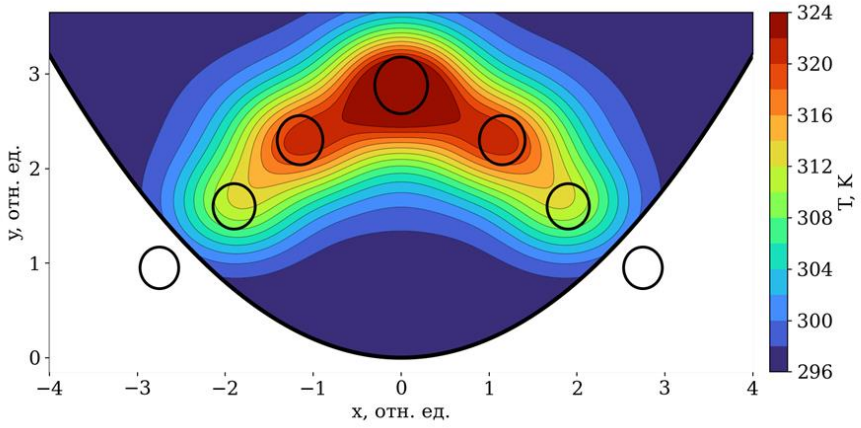


Рис. 4. Распределение температурного поля в осевом сечении вакуумированной полости коллектора по результатам CFD-моделирования

Конструктивное исполнение фрактально-тороидальной батареи и общий вид натурного образца ВФСВК на поворотной раме представлены на Рис. 5 и Рис. 6 соответственно.

Количественно установлено влияние числа тороидальных рядов (Рис. 7) при переходе от трёхрядной к пятирядной конфигурации температурный уровень системы возрастает с 314 до 323 К, полезная мощность – примерно в 1,5 раза, интегральный КПД – до 80 %, при этом гидравлические потери растут опережающими темпами, а прирост от каждого последующего ряда убывает, что определяет компромиссный характер выбора числа ярусов.

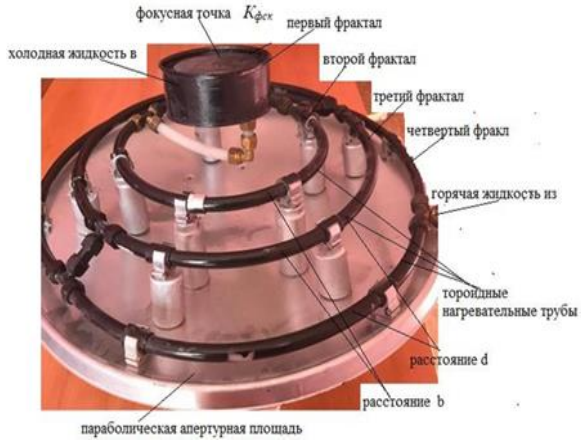


Рис. 5. Батарея тороидальных абсорберов вакуумного фрактального солнечного коллектора для нагрева воды.



Рис. 6. Общий вид фрактального солнечного коллектора.

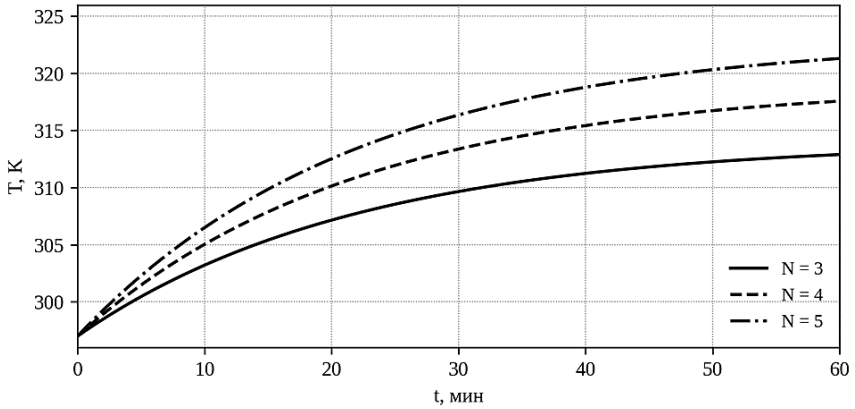


Рис. 7. Влияние числа тороидальных рядов на характеристики коллектора

На основе критериальной свёртки (9) выполнен инженерный выбор: базовой рекомендована пятирядная конфигурация с размещением ярусов по золотому сечению, селективным покрытием с $\alpha \geq 0{,}93$ и $\varepsilon \leq 0{,}08$, углом наклона 45° и скоростью теплоносителя 0,3 м/с.

В четвёртой главе **«Экспериментальные исследования, верификация моделей и оценка энергетической эффективности вакуумированного фрактального солнечного водонагревательного коллектора»** описаны опытный образец, измерительная система, программа и методика натурных исследований, приведены результаты исследования температурных режимов, теплопроизводительности и тепловых потерь, оценка неопределённости, повторяемости и воспроизводимости, верификация разработанных моделей и сравнительная оценка энергетической эффективности.

Натурные испытания опытного образца ВФСВК (апертура 0,54 м², три тороидальных яруса из стальных труб с селективным покрытием, двухосное слежение) выполнены 1 марта 2023 г. на открытой площадке в г. Туркестане в замкнутом контуре с баком-аккумулятором объёмом 20 л при начальной температуре воды 18 °C. Экспериментальную базу составили журнал испытаний (радиация на горизонтальной поверхности и в плоскости апертуры, температура воздуха, часовой КПД) и почасовой архив NASA POWER за 1–3 марта 2023 г., принятый в качестве контролного ряда для расчёта

непрерывного трёхсуточного цикла с двумя облачными днями. Обработка выполнена по расчётной модели системы «коллектор — бак», построенной на уравнениях теплового баланса второй главы. Интегральный КПД определялся по тепловому балансу бака-аккумулятора, что снижает влияние погрешности измерения малых перепадов температур на коллекторе.

Установлено, что в ясный день переходного периода при плотности потока в плоскости апертуры до 723 Вт/м² и температуре наружного воздуха 0–13 °C вода в баке нагревается до 64,8 °C, интегральный КПД составляет 53,6 %, удельная суточная выработка — 2,18 кВт·ч/м², максимальная удельная полезная мощность — 408 Вт/м². За непрерывный цикл 57 ч полезная энергия равна 2,13 кВт·ч при средневзвешенном КПД 46,4 %, а температура бака удерживается выше 45 °C после первого дня. Экспериментально-расчётным путём подтверждён ключевой эффект вакуумирования: приведённый коэффициент тепловых потерь составил U_L = 0,43 Вт/(м²·К), что в 4,2 раза ниже, чем при нарушении вакуума, и в 10 раз ниже, чем у невакуумированного исполнения с неселективной поверхностью, вследствие чего часовой КПД слабо зависит от температурного уровня.

Оценка неопределённости по GUM показала, что расширенная неопределённость интегрального КПД по балансу бака составляет 7,1 % (k = 2), тогда как часовые значения по перепаду температур на коллекторе имеют неопределённость 37–76 %. Повторяемость измерений подтверждена коэффициентами корреляции повторных серий 0,86–0,99, воспроизводимость — сохранением интегрального КПД на уровне 40–54 % при снижении энергии на апертуре в 2,2 раза.

Результаты верификации приведены на Рис. 8. Архивный ряд NASA POWER воспроизводит измеренные величины с коэффициентами корреляции 0,93 по радиации на апертуре и 0,98 по температуре воздуха при систематическом занижении радиации на 10 %. Средний за 10:00–17:00 КПД по расчётной модели (53,4 %) согласуется с журналом испытаний (51,8 %) в пределах неопределённости, полезная энергия за день — в пределах 11 %, а температура лучепоглощающей системы при $I_{ап} \approx 700$ Вт/м² согласуется с CFD-расчётом третей главы (314 К) на уровне 96 %. Идентифицированы параметры динамической RC-модели: $\eta_{о,эфф}$ = 0,569, U_L = 0,73 Вт/(м²·К), $C_{экв}$ = 3951 Дж/К, $T_с \approx$ 166 мин.

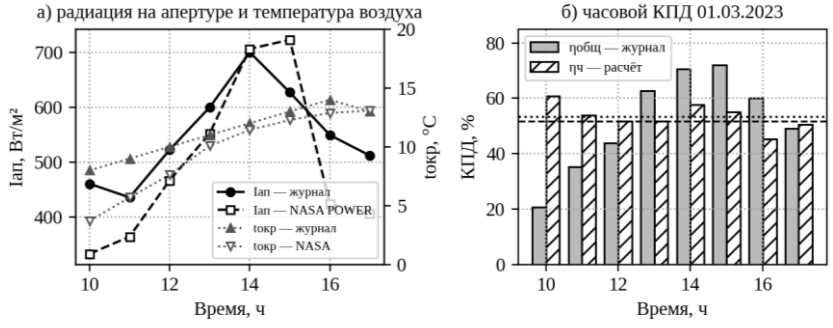


Рис. 8. Результаты верификации по данным натурных испытаний 01.03.2023: а) плотность потока в плоскости апертуры и температура воздуха по журналу и по NASA POWER; б) часовой КПД по журналу и по расчётной модели (линии — средние значения).

Сравнительная оценка с ПСВК той же апертурной площади выполнена при одинаковом баке, расходе, начальной температуре и одном и том же ряде метеоданных по линейным характеристикам теплового КПД:

$$\eta_{ВФСВК} = 56{,}9 - 73 \cdot x, \quad \eta_{ПСВК} = 75 - 450 \cdot x, \quad x = (T_{ср} - t_{окр})/I_{ап}. \qquad (10)$$

Из выражения (10) следует в шесть раз меньшая крутизна характеристики разработанного устройства, обусловленная вакуумированием полости и селективным покрытием. По результатам сопоставления (Рис. 9, Табл. 1) ВФСВК превосходит плоский селективный коллектор по полезной энергии на 20 % в ясный день и на 53 % за трёхсуточный цикл, обеспечивая средневзвешенный КПД 46,4 % против 31,1 % и температуру бака к вечеру ясного дня 64,8 °C против 57,0 °C. При этом ПСВК не удерживает порог 45 °C после второй ночи, а ВФСВК обеспечивает отбор горячей воды все три дня: в солнечном режиме — 40 л при 45 °C, с резервным вечерним догревом 300 Вт — 45–60 л при доле солнечной энергии 82–90 %.

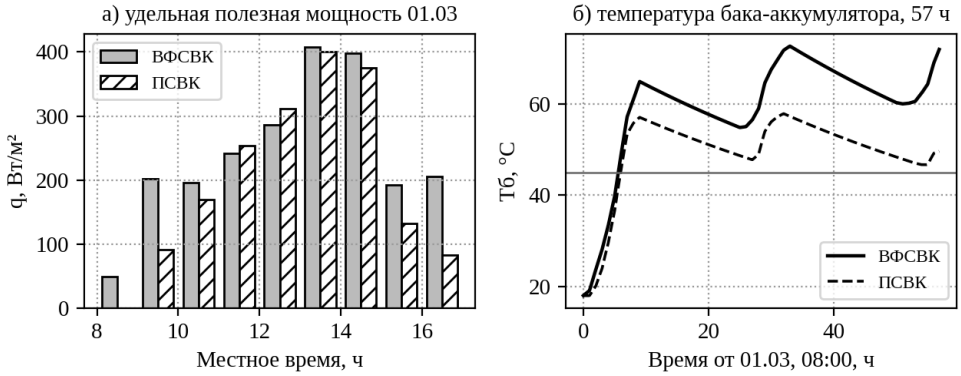


Рис. 9. Сравнительная оценка ВФСВК и ПСВК при одинаковых условиях: а) удельная полезная мощность по часам 1 марта 2023 г.; б) температура бака-аккумулятора в непрерывном цикле 57 ч.

Таблица 1

Сравнительные показатели ВФСВК и ПСВК за 1–3 марта 2023 г.

Показатель	ВФСВК	ПСВК
Энергия на плоскости приёмника за 57 ч, кВт·ч	4,586	4,472
Полезная энергия за 57 ч, кВт·ч	2,130	1,389
Полезная энергия за ясный день 01.03, кВт·ч	1,177	0,981
Максимальная удельная мощность, Вт/м²	408	400
Средневзвешенный тепловой КПД за 57 ч, %	46,4	31,1
Температура бака к 17:00 01.03 / максимальная, °C	64,8 / 72,6	57,0 / 57,8
Приведённый коэффициент потерь U_L, Вт/(м²·К)	0,43	4,5

По результатам работы сформулированы рекомендации по проектированию и применению коллектора в системах горячего водоснабжения: рабочий объём бака 20 л на модуль апертурой 0,54 м², расход теплоносителя 0,012–0,024 кг/с, порционный водоразбор 5–10 л при 45 °C, резервный догрев 300 Вт в вечерние часы, а также требования к селективному покрытию, сохранению вакуума и контролю их состояния, утрата которых снижает КПД на 25–40 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов, проведённых в диссертации исследований по решению поставленных в ней задач сформулированы следующие основные выводы:

1. Разработана усовершенствованная конструкция ВФСВК с параболической апертурой и иерархическим (фрактальным) размещением тороидальных абсорберов в вакуумированной полости, отличающаяся каскадно-ярусным нагревом теплоносителя «от периферии к фокусу», согласованным с распределением плотности концентрированного лучистого потока, где впервые дано функционалное обоснование закона масштабирования ярусов по золотому сечению. В результате установлено, что соотношение радиусов смежных ярусов $R_{(L+1)}/R_{(L)} = \varphi \approx 1{,}618$ вытекает из условия отсутствия их взаимного затенения (свойство $\varphi^2 = \varphi + 1$) и обеспечивает масштабную инвариантность структуры,

2. Обоснована и получена система исходных математических уравнений оптико-радиационного взаимодействия СР с концентрирующей и лучепоглощающей системой коллектора и теплового баланса его элементов, учитывающая раздельно конвективную, радиационную и кондуктивную составляющие тепловых потерь в вакуумированной полости. В результате установлено, что при разрежении полости конвективная составляющая внутренних потерь практически исключается и определяющим становится радиационный обмен, вследствие чего расчётный суммарный коэффициент тепловых потерь, отнесённый к поверхности абсорбера, составляет 0,93 Вт/(м²·К) (0,43 Вт/(м²·К) по площади апертуры) при степени черноты селективного покрытия 0,08, а оптическая эффективность тракта по прямому излучению составляет 0,702 при коэффициентах пропускания стекла 0,90, отражения концентратора 0,90 и поглощения селективного покрытия 0,93 соответственно.

3. Впервые для ВФСВК разработана динамическая математическая модель на основе электротепловой аналогии с введением эквивалентных термических сопротивлений и суммарных теплоёмкостей элементов, приведённая к операторному виду. В результате получена аналитическая передаточная функция первого порядка $W(p) = K/(T \cdot p + 1)$ с физически интерпретируемыми коэффициентом усиления $K = \eta_o \cdot A_{ап} \cdot F'$ и постоянной времени $T = C_{экв}/(U_L \cdot A_{ап})$, позволяющая рассчитывать переходные процессы и чувствительность полезной тепловой мощности к конструктивным параметрам. Установлено, что коллектор ведёт себя как фильтр нижних частот, сглаживающий кратковременные флуктуации инсоляции, что обеспечивает устойчивость теплопроизводительности при переменной облачности.

4. Установлены закономерности влияния топологии проточного абсорбера, ориентации и режимных параметров на теплопроизводительность СВК путём численного моделирования при одинаковой апертурной площади и единых оптико-конструктивных условиях. В результате показано, что определяющим фактором является равномерность отбора тепла по площади, в

которой меандровая схема обеспечивает удельную полезную мощность 537 Вт/м² и температуру на выходе 68 °C при инсоляции около 800 Вт/м², превосходя коллекторно-трубчатую схему на 10–11 %. При этом отклонение угла падения излучения на 30° снижает полезную мощность на 4–6 % для всех топологий. Получены параметрические зависимости теплового КПД от угла падения и температуры окружающей среды, полезной мощности от плотности потока радиации и массового расхода, определяющие рациональную область режимных параметров.

5. Разработана и верифицирована трёхмерная CFD-модель радиационно-конвективного теплообмена ВФСВК в программном комплексе ANSYS Fluent с применением модели излучения дискретных ординат совместно с моделью турбулентности k–ω SST и выполнением анализа сеточной независимости решения (изменение контролируемой величины менее 0,1 % при измелчении базовой сетки). В результате установлены физические закономерности работы устройства, такие как концентрация лучистого потока на элементах абсорбера 1000–2800 Вт/м² с максимумом в фокальной зоне, частичное выравнивание температурного поля межъярусным радиационным обменом и интенсификация переноса вихревыми зонами за тороидальными элементами и количественно определено влияние числа ярусов. При переходе от трёх к пяти рядам температурный уровень системы возрастает с 314 до 323 К, полезная мощность примерно в 1,5 раза, интегральный КПД – с 70 до 80 % при опережающем росте гидравлических потерь в 3 раза, на основании чего по обобщённому критерию обоснована рациональная пятирядная конфигурация.

6. Проведены натурные испытания опытного образца коллектора в климатических условиях переходного (холодного) периода года с оценкой неопределённости измерений и верификацией разработанных моделей. В результате показано, что максимальная удельная полезная мощность 408 Вт/м², суточная выработка 2,18 кВт·ч на 1 м² апертуры, интегральный тепловой КПД 53,6 % в ясный день и 46,4 % за трёхсуточный цикл с двумя облачными днями, где нагрев воды в баке-аккумуляторе составляет с 18 до 64,8 °C, а приведённый коэффициент тепловых потерь составляет 0,43 Вт/(м²·К).

7. Установлена энергетическая эффективность и практическая пригодность разработанного коллектора для систем горячего водоснабжения и разработаны рекомендации по его проектированию и применению. В результате показано, что при одинаковой апертурной площади и идентичных внешних условиях вакуумированный фрактальный коллектор превосходит плоский селективный солнечный водонагревательный коллектор по полезной энергии на 20 % в ясный день и на 53 % за трёхсуточный цикл переходного периода, обеспечивая средневзвешенный тепловой КПД 46,4 % против 31,1 % и температуру бака к вечеру ясного дня 64,8 °C против 57,0 °C.

SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/2025.27.12.T.19.01 ON AWARD OF THE SCIENTIFIC DEGREES AT FERGANA STATE TECHNICAL UNIVERSITY

FERGANA STATE TECHNICAL UNIVERSITY
KHOJA AKHMET YASSAWI INTERNATIONAL KAZAKH-TURKISH UNIVERSITY

KIBISHOV ADYLKHAN TALGATOVICH

DEVELOPMENT OF A VACUUM FRACTAL SOLAR WATER-HEATING COLLECTOR DEVICE

05.05.06 – Power Plants Based on Renewable Energy Sources

DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) IN TECHNICAL SCIENCES

Fergana – 2026

Theme of the dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under No. B2023.4.PhD/T4243.

The dissertation was prepared at Fergana State Technical University and the Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University.

The abstract of the dissertation is available in three languages (Uzbek, Russian, and English (resume)) on the website (www.fstu.uz) and on the Information and Educational Portal "ZiyoNet" (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor:	**Avezova Nilufar Rabbanakulovna** doctor of technical sciences, senior research fellow
Official opponents:	**Matchanov Nuraddin Azadovich** doctor of technical sciences, senior researcher; **Voxidov Akmal Ulashevich** Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences.
Lead organization:	Osh Technological University (Kyrgyz Republic)

Dissertation defense will take place "28" 11 2026 at 10⁰⁰ at the meeting of the Scientific Council PhD.03/2025.27.12.T.19.01 at the Fergana State Technical Universitete (Address: 150100, Fergana, Fergana str., 86. Phone: (+99873) 241-12-06, fax (+99873) 241-12-06, e-mail: ilmiy-kengash@ferpi.uz, small meeting room).

The thesis can be found in the library of the Fergana State Technical Universitete. (registered under No. ____) Address: 150100, Fergana, st. Fergana, 86. Tel: (+99873) 241-12-06, e-mail: ilmiy-kengash@ferpi.uz.

Abstract of the dissertation sent out on "___" _____ 2026.
(Registry record No. ____ on "___" _____ 2026)

U.R. Salomov
Chairman of Scientific Council on award of scientific degrees, DSc, professor

A.A. Quchqarov
Scientific secretary of scientific council on award of doctor philosophy, PhD, docent

L.K. Mamadalieva
Chair of the Scientific Seminar under scientific council on award of doctor philosophy, DSc, professor.

INTRODUCTION (Abstract of PhD dissertation)

The aim of the research is to improve the design of the evacuated fractal solar water-heating collector, to ensure its stable heat output under conditions of low solar insolation and sub-zero ambient temperatures, and to develop methods for calculating the thermal performance characteristics of the collector.

The objectives of the research are:

a critical analysis of the current state and development trends of solar hot water supply systems, of the designs of flat-plate, evacuated, concentrating and fractal collectors and of patent documents with identification of the research gap, and, on this basis, the development of an improved design of the evacuated fractal solar water-heating collector;

the development of a mathematical model of the heat balance and of a dynamic model of the collector based on the electro-thermal analogy using the transfer function apparatus, which makes it possible to calculate transient processes and to formulate criteria for optimising the design and operating parameters;

the development of a CFD model of radiative-convective heat transfer in the collector, the establishment of regularities of the influence of the number and geometry of the toroidal tiers, the orientation and the operating parameters on the energy characteristics, and the substantiation of a rational configuration of the device;

experimental studies of a prototype of the collector under field conditions with an assessment of the measurement uncertainty, verification of the developed models and a comparative assessment of the energy efficiency relative to a flat-plate solar water-heating collector.

The object of the research is a vacuum fractal solar water-heating collector device with a parabolic aperture and a toroidal battery of absorbers for hot water supply systems.

The scientific novelty of the research is as follows:

an improved design of an evacuated fractal solar water heating collector has been developed, based on the hierarchical placement of toroidal absorbers according to the golden ratio in an evacuated cavity with a parabolic aperture, eliminating mutual shading of the tiers and ensuring scale invariance of the radiation-absorbing structure;

a dynamic mathematical model of the collector has been developed, enabling the calculation of transient processes using a first-order analytical transfer function and ensuring the stability of heat output under variable cloudiness due to the properties of a low-pass filter;

the methodology for calculating the energy characteristics of the collector has been improved based on CFD modeling of radiative-convective heat transfer, taking into account inter-tier radiative exchange and secondary flows in curved channels;

an energy-efficient evacuated fractal solar water heating collector device with a selective coating has been developed, which, by evacuating the cavity, allows for reducing heat losses and increasing the weighted average thermal efficiency to 66.0%.

The practical results of the research are as follows:

- a cost-effective experimental prototype of the vacuum fractal solar water-heating collector, suitable for the autonomous hot water supply of remote consumers, has been developed and created, providing water heating up to 64.1 °C and a daily output of 2.81 kWh per 1 m² of aperture at an average insolation of up to 529 W/m²;

- it has been substantiated by computation and experiment that the arrangement of the toroidal tiers according to the golden ratio, combined with the evacuation of the cavity, makes it possible to bring the weighted average thermal efficiency of the collector to 66.0 % and to reduce the heat losses to 4.4 % of the energy incident on the aperture.

Scientific and practical significance of the research results

The scientific significance lies in the development of the theory for calculating vacuum fractal solar water-heating collectors, as well as in the development of a mathematical model that makes it possible to assess the influence of the law of arrangement of the toroidal tiers, their number, the optical characteristics of the surfaces and the flow regime of the heat-transfer fluid on the efficiency of the system.

The practical significance lies in the fact that the developed vacuum fractal solar water-heating collector device, comprising a parabolic aperture, a toroidal battery of absorbers, an evacuated cavity and a storage tank, provides water heating up to 64.1 °C in the transitional period of the year, a weighted average thermal efficiency of up to 66.0 %, and the replacement of up to 60 % of the fuel and energy resources used for hot water supply needs throughout the year.

Implementation of the research results. Based on the results obtained in the development of a vacuum fractal solar water-heating collector device for hot water supply systems:

the design of the vacuum fractal solar water-heating collector and its mathematical model describing the conversion of solar energy into thermal energy, taking into account thermal radiation and convection, were used in the development of the textbook *“Heat and Electric Energy Storage and Generation”* at Tashkent State Technical University. As a result, bachelor's and master's educational programs in “Alternative Energy Sources” and “Renewable Energy Sources” were developed, and the implementation of the fundamental project F-OT-2021-497 was supported;

the vacuum fractal solar water-heating collector (IAP36213) was implemented at a facility of JSC “Kentau Transformer Plant” (Certificate No. 1 dated April 25, 2025, issued by JSC “Kentau Transformer Plant,” Republic of Kazakhstan). As a result, savings of nearly 60% in fuel and energy resources used for hot water supply during the cold season were achieved.

Approbation of the research results. The main results of this research were presented and discussed at 4 international scientific and practical conferences held in the Republic of Kazakhstan and the Republic of Uzbekistan.

Publication of results. Fifteen scientific works have been published on the dissertation topic, including 9 scientific articles in journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan and the Republic

of Kazakhstan for the publication of the main scientific results of doctoral dissertations, including 2 articles in foreign journals (referenced in the Scopus Q1 and Q2 databases), and 1 patent for an invention of the Republic of Kazakhstan was obtained.

The structure and volume of the thesis. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of references. The volume of the dissertation is 120 pages.

E’LON QILINGAN ISHLAR RO‘YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I-bo‘lim (I -част, I part)

1. Н.Т. Рустамов, А.Т. Мейрбеков, А.Т. Кибишов. Вакуумный фрактальный солнечный коллектор. Патент на изобретение РК № 36213 от 30.06.2023. https://gosreestr.kazpatent.kz/Invention/Details?docNumber=351786

2. N.T. Rustamov, A.T. Kibishov, N. Genc, S.A. Babakhan, E. Kamal. Thermal Conductivity of a Vacuum Fractal Solar Collector. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2023, Vol. 13, pp. 612–618. (Scopus Q2; 05.00.00, № 2). DOI: 10.20508/ijrer.v13i2.14191.g8730
https://www.scopus.com/pages/publications/85165145912?origin=resultslist

3.A.T. Kibishov, G.A. Kilic, N.T. Rustamov, N. Genc. Thermal Analysis of Radiation Heat Transfer of Improved Fractal Solar Collectors. *Applied Sciences*, 2024, 14(23), 11155. (Scopus Q1; 05.00.00, № 2). DOI: 10.3390/app142311155
https://www.scopus.com/pages/publications/85211788232?origin=resultslist

4. Н.Т. Рустамов, А.Т. Кибишов, Ф.М. Исроилов, К. Ерназар. Коэффициент полезного действия вакуумированного фрактального солнечного коллектора. *European Journal of Technical and Natural Sciences*, № 2, 2023, с. 46–52. (ISSN 2414-2352). (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 12 baza) Index Copernicus Value (ICV) = 83.17 (2024) DOI:10.29013/EJTNS-23-2-46-53
https://ppublishing.org/archive/publication/589-koeffitsient-poleznogo-dejstviya-vakuumirovann

5. Н.Т. Рустамов, А.Т. Кибишов, Ж.С. Калимбетова. Математическая модель вакуумного фрактального солнечного коллектора. *European Journal of Technical and Natural Sciences*, № 3, 2023, с. 38–46. (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 12 baza) (ISSN 2414-2352). Index Copernicus Value (ICV) = 83.17 (2024) DOI:10.29013/EJTNS-23-3-38-47
https://ppublishing.org/archive/publication/697-matematicheskaya-model-vakuumnogo-fraktalnogo-

6. Н.Т. Рустамов, А.Т. Кибишов, Н.Б. Мухамеджанов. Thermal and Energy Characteristics of a Cogenerative Fractal Solar Collector. *European Journal of Technical and Natural Sciences*, № 1, 2024, pp. 3–10. (ISSN 2414-2352). (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 12 baza) Index Copernicus Value (ICV) = 83.17 (2024)
https://www.researchgate.net/publication/408449504_Thermal_and_Energy_Characteristics_of_a_Cogenerative_Fractal_Solar_Collector

7. Н.Т. Рустамов, А.Т. Кибишов, Н.Б. Мухамеджанов. On the Issue of Increasing the Efficiency of Using Solar Insolation in Water-Heating Solar Collectors. *European Journal of Technical and Natural Sciences*, № 2, 2024, pp. 3–9. (ISSN 2414-2352). (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya

etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 12 baza) Index Copernicus Value (ICV) = 83.17 (2024) DOI:10.29013/EJTNS-24-2-3-9
https://ppublishing.org/archive/publication/1059-on-the-issue-of-increasing-the-efficiency-of-

8. Н.Т. Рустамов, А.Т. Кибишов, М. Суханов. Некоторые особенности фрактального солнечного коллектора. Научный журнал «Архивариус», т. 7, № 1 (55), 2021, с. 36–41. (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 12 baza) https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-osobennosti-fraktalnogo-solnechnogo-kollektora/viewer

9. А.Т. Кибишов, Ф.М. Исроилов, К. Ерназар. Вакуумированный фрактальный солнечный коллектор. *Молодой ученый*, № 8 (455), 2023, с. 40–45. (OAK dissertatsiyalar ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro‘yxati 3-bet 18 baza)
https://moluch.ru/archive/455/100273

10. Н.Р. Авезова, А.А. Кучкаров, А.Т. Кибишов, М.Х. Дехконова. Численный анализ влияния угла наклона и конструкции абсорбера на эффективность солнечных тепловых коллекторов в резко континентальном климате. Научно–технический журнал ФерГТУ, 2025, Т.29, №6, с. 116-130. (05.00.00 №20).
https://www.researchgate.net/publication/408477767_Cislennyj_analiz_vliania_ugla_naklona_i_konstrukcii_absorbera_na_effektivnost_solnecnyh_teplovyh_kollektorov_v_rezko_kontinentalnom_klimate

II -bo‘lim (II -част, II part)

11. N.T. Rustamov, A.T. Kibishov. Vacuum Fractal Solar Collector. *BIO Web of Conferences*, 84, 05024, 2024. https://doi.org/10.1051/bioconf/20248405024
https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2024/03/bioconf_aquaculture2024_05024/bioconf_aquaculture2024_05024.html

12. А.Т. Кибишов, М. Суханов. Теплопроизводительность плоского солнечного коллектора. Материалы Международной научно-практической конференции «Роль инновационных технологий в новом мире», с. 3–9. 28–29 февраля 2020 года. Алматы.
https://www.researchgate.net/publication/408450458_TEPLOPROIZVODITELNOST_PLOSKOGO_SOLNECNOGO_KOLLEKTORA#fullTextFileContent

13. Н.Т. Рустамов, А.Т. Кибишов, Ф.М. Исроилов. Коэффициент полезного действия фрактальных солнечных коллекторов. Материалы Международной научно-практической конференции «Инновационные решения технических, инженерно-технологических задач производства», с. 699–702. Жиззах, 28–29 октября 2022 г.
https://www.researchgate.net/publication/408475606_Koefficient_poleznogo_dejstvia_fraktalnyh_solnecnyh_kollektorov

14. Н.Т. Рустамов, А.Т. Кибишов. Вакуумный фрактальный солнечный коллектор. Материалы Международной научно-практической конференции «Проблемы и решения эффективного использования альтернативных источников энергии», с. 204–210. Фергана, 7–8 ноября 2023 г. https://www.researchgate.net/publication/408477761_Vakuumnyj_fraktalnyj_solnecnyj_kollektor

15. Н.Р. Авезова, Н.Т. Рустамов, А.Т. Кибишов. Вакуумный фрактальный солнечный коллектор. Международная научно-практическая конференция «Инновационная энергетика: фундаментальные основы энергетики и инновационные инженерные решения», 9–10 апреля 2025 г. Ургенч, Узбекистан. https://www.researchgate.net/publication/408477852_Vakuumnyj_fraktalnyj_solnecnyj_kollektor

Avtoreferatning o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi nusxalari
Farg‘ona davlat texnika universitetining «Ilmiy texnika» jurnali tahririyatida
tahrirdan o‘tqazildi.

0485

Bosishga ruxsat etildi: 30.10.2026.
Bichimi 60×84 1/16 “Times New Roman”
garniturada raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i 2,75. Adadi 100 nusxa. Buyurtma № 203.
“Innovatsion rivojlanish nashriyot-matbaa uyi” bosmaxonasida chop etildi.
Manzil: 100174, Toshkent sh., Qora-Qamish 2/1, 22a-uy.
Telefonlar: (+998) 97-705-90-35, (+998) 99-920-90-35