

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FARG'ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

NORBO'TAYEV MA'SUDJON ABDURASULOVICH

**ISHLAB CHIQARISHDA FOYDALANISHGA MO'LJALLANGAN
SAMARADOR YARIMO'TKAZGICHLI TERMOELEKTRIK ENERGIYA
MANBALARINI ISHLAB CHIQISH**

01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Namangan-2025

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

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

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

Norbo'tayev Ma'sudjon Abdurasulovich

Ishlab chiqarishda foydalanishga mo'ljallangan samarador yarimo'tkazgichli termoelektrik energiya manbalarini ishlab chiqish..... 3

Норбутаев Маъсуджон Абдурасулович

Разработка эффективных полупроводниковых термоэлектрических источников энергии, предназначенных для использования в производстве..... 25

Norbutayev Masudjon Abdurasulovich

Development of efficient semiconductor thermoelectric energy sources for use in production..... 47

E'lon qilingan ishlar ro'uxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 51

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

FARG'ONA DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

NORBO'TAYEV MA'SUDJON ABDURASULOVICH

**ISHLAB CHIQRISHDA FOYDALANISHGA MO'LJALLANGAN
SAMARADOR YARIMO'TKAZGICHLI TERMOELEKTRIK ENERGIYA
MANBALARINI ISHLAB CHIQISH**

01.04.10 – Yarimo'tkazgichlar fizikasi

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI
AVTOREFERATI**

Namangan-2025

Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalari vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.3.PhD/T2839 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Farg'ona davlat texnika universitetida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasiga (www.namdtu.uz) va Ziyonet Axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: **Kasimaxunova Anarxan Mamasadikovna**
texnika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar: **Qo'ldashov Obbozjon Xokimovich**
texnika fanlari doktori, professor

Alijonov Donyor Dilshodovich
texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Yetakchi tashkilot: **Qoraqalpoq davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Namangan davlat texnika universiteti huzuridagi ilmiy darajalar beruvchi PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 raqamli ilmiy kengashning 5 dekabr soat 12⁰⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko'chasi, 7-uy. Tel./faks: (99869) 225-10-07; (99869) 225-76-75, e-mail: info@namdtu.uz, Namangan davlat texnika universiteti 6-bino, 1-qavat, ilmiy kengash xonasi).

Dissertatsiya bilan Namangan davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (85-raqam bilan ro'yxatga olingan.) Manzil: 160103, Namangan shahri, Yangi Namangan tumani, I.Karimov ko'chasi, 12-uy. Tel: (99869) 234-14-85.

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil " 21 " 11 da tarqatildi.
(2025 yil " 21 " 11 dagi № 8 raqamli reestr bayonnomasi.)



U.I. Erkaboyev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi, f.-m.f.d., professor

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

N.Yu.Sharibayev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, f.-m.f.d., professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda sanoat va ishlab chiqarishning jadal sur'atlarda o'sib borayotganligi, ikkilamchi issiqlik energiya manbalarining keskin ortib borishiga olib kelmoqda. Natijada, "Issiqxona effekti (парниковый эффект)", haroratning global ortishi kabi salbiy effektlar kuzatilmoqda. Termoelektrik energiya o'zgartirgichlar yordamida ikkilamchi issiqlik energiya manbalaridan chiqayotgan issiqlik energiyasini elektr energiyasiga aylantirish, ushbu salbiy omillarni bartaraf etish bilan birga qo'shimcha elektr energiyasini olish imkonini beradi. Shu sababli issiqlik energiyasini elektr energiyasiga aylantirishning iqtisodiy samarali, texnologik sodda va unumli yo'llarini ishlab chiqishga e'tibor qaratilmoqda.

Jahonda termoelektrik o'zgartirgichlarni ishlab chiqarishda qo'llanuvchi yarimo'tkazgichli materiallarning optimal stexiometrik tarkibini aniqlash, ularni tayyorlash texnologiyasini yaxshilash, termoelektrik o'zgartirgichlarni qo'llash sohalarini kengaytirish yo'llarini topishga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. p-BiSbTe/n-BiTeSe asosidagi termoelektrik generator elementlarini yuqori aniqlikda va samaradorlikda tayyorlash texnologiyasi takomillashtirish masalalari ustuvor yo'nalishlardan hisoblanmoqda. Bu borada, elektron va kovakli o'tkazuvchanlikka ega qorishmalaridan iborat termoelektrik materiallarni olish texnologiyasini takomillashtirish, termogenerator shoxchalarining haroratga bog'liq ravishda kengayish koeffitsiyentlarini hisobga olgan holda, termobataryalarning konstruksiyasini imitasion modellashtirishga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda termoelektrik o'zgartirgichlarni tayyorlashda muhim bo'lgan, yarim o'tkazgich materiallarining tarkibiga turli qorishmalar kiritish orqali ularning foydali ish koeffitsiyentini oshirishga, kichik quvvatli energetikada foydalanishga qaratilgan ilmiy-tadqiqotlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 9 sentyabrdagi PF-220-sonli "Energiya tejoyvchi texnologiyalarni joriy qilish va kichik quvvatli qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish bo'yicha qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi Farmonida "... ma'muriy-maishiy bino va inshootlarda, shu jumladan aholi massivlari va xonadonlarida muqobil energiya manbalarini qo'llash bo'yicha manzilli chora-tadbirlarni amalga oshirish..."¹ bo'yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirishda termoelektrik o'zgartiruvchilardagi issiqlik almashinuvchi jarayonida issiqlik almashinuvchi novlar orasidagi masofani hisoblashni modellashtirish, ishlab chiqarish korxonalarida mavjud bo'lgan kondensatorlarni zaryadlash uchun termoelektrik zaryadlash qurilmalarini yaratish muhim ahamiyat kasb etmoqda.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020 yil 10 iyuldagi PQ-4779-sonli "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"gi², 2022 yil 2 dekabrdagi PQ-436-sonli "2030-yilgacha O'zbekiston Respublikasining "yashil" iqtisodiyotga

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni , 09.09.2022 yildagi PF-220-son

² O'zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori, 10.07.2020 yildagi PQ-4779-son

o'tishiga qaratilgan islohotlar samaradorligini oshirish bo'yicha chora-tadbirlar to'g'risida"³, shuningdek, 2023 yil 16 fevraldagi PQ-57-sonli "2023-yilda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini va energiya tejavchi texnologiyalarni joriy etishni jadallashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"⁴gi qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning Respublika fan va texnologiyalar rivojlantirishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Dissertatsiya ishi bo'yicha Respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining III. "Energetika, energoresurs tejamkorligi, asbobsozlik, zamonaviy elektronika, mikroelektronika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish"ning ustuvor yo'nalishlariga mos keladi.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Termoelektrik energetika sohasida dastlabki nazariy tadqiqotlar fizik olimlar J-B.J.Furye va X.K.Erstedlar tomonidan olib borilgan bo'lsa, keyinchalik Farmer, Markus, Bekkerel, rus olimi A.F.Ioffe va uni shogirdlari L.S.Stilbans, Ye.K. Iordanishvili, Yu.A.Ravich kabilar tomonidan amaliy ilmiy-tadqiqot, loyiha-konstruktorlik va rasionalizatorlik ishlari olib borilgan. Dunyo miqyosida L.P.Bulat, I.A.Drabkin termoelektrik batareyalarning xossalari va konstruksiyalarini, L.Ye.Shalimova qatlamli xalkogenidlarning tuzilishi va termoelektrik xususiyatlarini, M. K. Jitinskaya, S.A.Nemov $PbSb_2Te_4$ ning anizotropiyasini, L.D.Xiks, M.S.Dresselhaus bir jinsli materiallarning termoelektrik parametrlarini, Yu.A.Boykov, V.A.Danilov $(Bi,Sb)_2(Te,Se)_3$ asosidagi pardasimon qurilmalarni, V.K.Zaysev, A.A.Andreyev marganes silisidi monokristallarining anizotropiyasini tadqiq qilgan. Xorijiy olimlar — Kremer Deniyel, Pudel Krovat, Fen Syan-Pin, Keylor Dj.Kristofer, Yu Bo, Yan Syao, Mogu Li Ya, Van Syaovey, Vanga Deji, Muto Endryu, Makinani Kennet, Kyeza Matteo, Ren Chjifen, Chen Banlar esa yuqori samaradorlikka ega quyosh termogeneratorlari ustida izlanishlar olib borgan.

Respublikamizda ham termoenergetika sohasida G.Abduraxmanov, B.L.Oksengendler, Ya.Usmanov, A.S.Yesbergenova, R.A.Zoxidov, G.S.Vohidova, S.A.Mamatqulova, R.Alimov, X.M.Iliyev, Q. Gaynazarova va boshqalar tomonidan bir qator nazariy va ilmiy-amaliy ishlar bajarilib kelinmoqda. Jumladan professor A. M. Kasimaxunova raxbarligi ostida hozirga qadar kaskadli, ikki tomonlama sezuvchan, tanlangan nur fototermogeneratorlarining turli namunalari yaratilgan hamda amalda tatbiq qilinib kelinmoqda. Farg'ona davlat universiteti ilmiy laboratoriyasida M.B.Nabiyev boshchiligida Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3 uch qorishmali termoelektrik materiallarni tarkibiga turli xil legirlovchi moddalar kiritish orqali n tipli shoxchalarni tayyorlash bo'yicha salmoqli natijalarga erishildi.

Shu bilan birga, termogeneratorlarni sanoat issiqlik energiyasidan foydalanib elektr energiyasini olish, rele himoyasi va avtomatika sohasida KBlarni va akkumulyator batareyalarini bir paytning o'zida zaryadlovchi va hamda himoya qurilmasi uchun operativ tok manbai vazifasini bajarish muammolari yetarli darajada o'rganilmagan.

³ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori, 02.12.2022 yildagi PQ-436-son

⁴ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining qarori, 16.02.2023 yildagi PQ-57-son

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim yoki ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya Farg'ona politexnika institutida OT-F-3-19 «Energiya o'zgartirishning issiqlik sikllariga asoslangan quyosh energetik qurilmalari uchun yangi tipdagi parabolosilindrik konsentratorlarining modul tizimlarini yaratish bo'yicha fundamental tadqiqotlarni rivojlantirish» nomli ilmiy loyiha, "Elektroshok" MCHJ (Shartnoma № 6-20, ilmiy tadqiqot sektori (ITS) tomonidan chiqarilgan №6 sonli 16.03.20 yil kunidagi buyruq) va "Fergana Avtomat Raschot" MCHJ (Shartnoma № 55-21, ITS tomonidan chiqarilgan №44 x\sh 02.11.21 yil kunida chiqarilgan buyruq)lari tomonidan tuzilgan xo'jalik shartnomalari asosida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi yarimo'tkazgichli p-BiSbTe va n-BiTeSe materiallaridan tayyorlangan termoelektrik o'zgartirgichlar asosida ishlab chiqarish korxonalarida mavjud bo'lgan kondensatorlarni zaryadlash uchun termoelektrik zaryadlash qurilmalarini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

p-BiSbTe va n-BiTeSe qorishmalaridan iborat termoelektrik materiallarni olish texnologiyasini takomillashtirish;

termoelementlarning shoxchalarini elektroerozion qurilma yordamida tayyorlash orqali termoelektrik batareyalarni yasash texnologiyasini ishlab chiqish;

termoelektrik o'zgartirgich shoxchalarining, haroratga bog'liq ravishda kengayish koeffitsiyentlarini hisobga olgan holda, termobatareyalarning konstruksiyasini imitasion modellashtirish;

bir nechta issiqlik manbaiga ega termoelektrik o'zgartiruvchilardagi issiqlik almashinuvi jarayonida issiqlik almashinuvchi novlar orasidagi masofani hisoblash uchun matematik model ishlab chiqish;

ishlab chiqarish korxonalarida mavjud bo'lgan kondensatorlarni zaryadlash uchun termoelektrik zaryadlash qurilmalarini yaratish.

Tadqiqot obyekti sifatida yuqori samaradorlik koeffitsiyentiga ega bo'lgan, elektroerozion qurilma yordamida olingan BiSbTe (p-tip) va BiTeSe (n-tip) asosidagi termoelektrik materiallari, kremniy yarim o'tkazgich materiali, kondensator hamda akkumulyator batareyalari olingan.

Tadqiqot predmeti issiqlik energiyasi ta'sirida termoelektrik o'zgartirgichlar shoxchalari bo'ylab yuzaga keluvchi elektro-fizik hodisalar, BiSbTe (p-tip) va BiTeSe (n-tip) materiallarning stexiometrik tarkib o'zgarishiga bog'liq ravishda o'zgaruvchi parametrlar tashkil etadi.

Tadqiqot usullari. Tadqiqot jarayonida Zeebek va Peltie xodisalari, Joul-Tomson differensial effektining umumiy termodinamik nazariyasi, Tomson va Joul issiqliklari nazariyalari, energiya saqlanish qonuniyatlari, issiqlikni elektr energiyasiga aylanish jarayonlari va qonuniyatlari, issiqlik energiyasini elektrga aylantirishni samaradorligini oshirish usullari va volt-amper tavsiflari, issiqlik oqimlarini va haroratni o'lchash usullari hamda matematik hisoblashlar metodlari va yarimo'tkazgich hajmida yuz beradigan jarayonlarni matematik modellashtirish metodlari.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

elektroerozion qurilma yordamida p–BiSbTe/n–BiTeSe asosidagi termoelektr generator elementlarini yuqori aniqlikda va samaradorlikda tayyorlash texnologiyasi takomillashtirilgan;

ilk bor, Bi₂Te₃ asosidagi termoelektrik materiallarning “a” va “c” kristallografik yo‘nalishlar bo‘yicha chiziqli issiqlik kengayish koeffitsiyentlari (ChKHK) –55...+45 °C harorat oralig‘ida Grunayzen modeli asosida modellashtirildi hamda ularning anizotropiya mezonining termobatareya konstruksiyasining mexanik va issiqlik barqarorligiga ta‘sir etuvchi miqdoriy qonuniyati aniqlangan;

ilk bora, termoelement shoxchalarining geometrik o‘lchamlarini (uzunlik va kesim yuzasini) o‘zgartirish orqali yuklama va optimal toklar orasidagi nomutanosiblikni kamaytirish imkoniyati aniqlangan, ya‘ni bu nomutanosiblikning aniq geometrik bog‘liqligi matematik jihatdan asoslab berilgan;

ilk bora, $\Delta T=80-100$ °C harorat farqida ishlovchi termoelektr manba asosida 120 kVarli kondensator va akkumulyator batareyalarini bir vaqtning o‘zida zaryadlovchi hamda himoya tizimi uchun operativ tok manbai vazifasini bajaruvchi sanoat miqyosidagi energiya manbai yaratilgan;

yuqori haroratlar intervalida ishlaydigan kremniy asosidagi termoelektrik generatorlarning energetik harakteristikalarini aniqlash uchun matematik model ishlab chiqilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

ishlab chiqarish korxonalarida ishlatilishga mo‘ljallangan termoelektrik generatorlar konstruksiyalari ishlab chiqilgan va ulardagi issiqlik almashinuv jarayonlarini fizik xodisalari ko‘rsatilib berilgan;

yarimo‘tkazgichli termoelektrik materialidan termoelementlarni elektron va teshikli o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan shoxchalarini tayyorlash, yagona termobatareya yig‘ish va ekspluatatsiya jarayonidagi salbiy effektlarni oldini oluvchi texnologiya ishlab chiqilgan.

o‘zgarmas tok manbai bo‘lgan TEG lardan, sanoatda reaktiv quvvat yetishmovchiligini qoplash maqsadida, zaryadlash jarayonini uzluksiz amalga oshirish imkoniyatiga ega bo‘lgan qurilma sifatida foydalanish bo‘yicha tavsiyalar ishlab chiqildi, elektr ulanish prinsiplari ko‘rsatilib berilgan;

TEG lardan sanoatda foydalanish energiya yo‘qotishlari muammolarini qisman hal qila olishligi va iqtisodiy jihatdan maqbul ekanligi, hamda ekologik nuqtai nazardan ustunligi amaliy masalalarda keng ko‘lamda foydalanish mumkin ekanligini ko‘rsatilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot natijalarining ishonchliligi izlanishlarning zamonaviy usul va o‘lchash vositalaridan foydalangan holda o‘tkazilganligi, nazariy va eksperimental tadqiqotlarning o‘zaro adekvatligi, bajarilgan tadqiqotlar asosida ishlab chiqilgan termobatareya sinovlarining ijobiy natijalari va amaliyotga joriy etilganligi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati bir nechta issiqlik manbaiga ega termoelektrik o‘zgartiruvchilardagi issiqlik almashinuvi jarayonida issiqlik almashinuvchi novlar orasidagi masofani hisoblash uchun ishlab chiqilgan matematik modellar va olingan natijalar termoelektrik

shoxchalar bo‘ylab ishchi va optimal toklar o‘rtasidagi nomutanosibliklar fizik jarayonini ochib berishi mumkinligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati ishlab chiqilgan termogenerator rele himoyasi va avtomatika sohasida reaktiv quvvat yetishmovchiligini ta‘minlashda kondensator batareyalarini zaryadlovchi manba yaratilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Ishlab chiqarish sanoati uchun termoelektrik generatorlarni yaratish va ularni parametrlarini tekshirish natijalari bo‘yicha:

ishlab chiqarish korxonalarida foydalanishga mo‘ljallangan termogeneratorlar energetika tizimlarida o‘zgarmas operativ tok manbai sifatida rele himoyasi qurilmalarini operativ tok zanjirini o‘zgarmas tok elektroenergiyasi bilan ta‘minlash maqsadida “Farg‘ona issiqlik elektr markazi” AJ da joriy qilingan. (“Farg‘ona IEM” AJ bilan Ilmiy-tadqiqot natijalarining joriy etilganligi bo‘yicha issiqlik elektr stansiyalari AJ ning 2024 yil 30 avgustdagi 08-5/2007 ma‘lumotnomasi) Natijada korxonada termobatareyalarni operativ tok manbai sifatida rele himoyasi qurilmalarini operativ tok zanjirini o‘zgarmas tok elektroenergiyasi bilan ta‘minlash orqali 8 324 000 so‘mlik iqtisodiy samaradorlikka erishilgan.

Elektroerozion qurilma yordamida p–BiSbTe/n–BiTeSe asosidagi termoelektr generator elementlarini yuqori aniqlikda va samaradorlikda tayyorlash texnologiyasi “FOTON” AJ da joriy etilgan. (Uzeltexsanoatning "FOTON" AJni 2024 yil 5 noyabrdagi №190 sonli ma‘lumotnomasi). Buni natijasida ishlab chiqarish korxonasiga mo‘ljallangan 120 kV li KB larni va akkumulyator batareyalarini bir paytning o‘zida zaryadlovchi va hamda rele himoya qurilmasi uchun operativ tok manbai vazifasini o‘tovchi manbalarini ishlab chiqarishga tavsiya berilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari 8 ta, jumladan 6 ta xalqaro va 2 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o‘tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e‘lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 30 ta ilmiy ish, shulardan 1 foydali model uchun patent, O‘zbekiston respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 6 ta ilmiy maqola, jumladan 1 tasi Scopus ma‘lumotlar bazasida kiritilgan horijiy halqaro jurnallarda nashr qilingan hamda tadqiqot mavzusi bo‘yicha 5 ta EHM uchun dasturiy guvohnomalar olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to‘rttabob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 116 betni tashkil etgan.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning kirish qismida o‘tkazilgan tadqiqotlarning dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqot maqsadi va vazifalari, ob‘yekti va predmeti aniqlangan, Respublika fan va texnologiyalari taraqqiyotining ustivor yo‘nalishlariga mosligi ko‘rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon etilgan, olingan natijalarning nazariy va amaliy mohiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarining

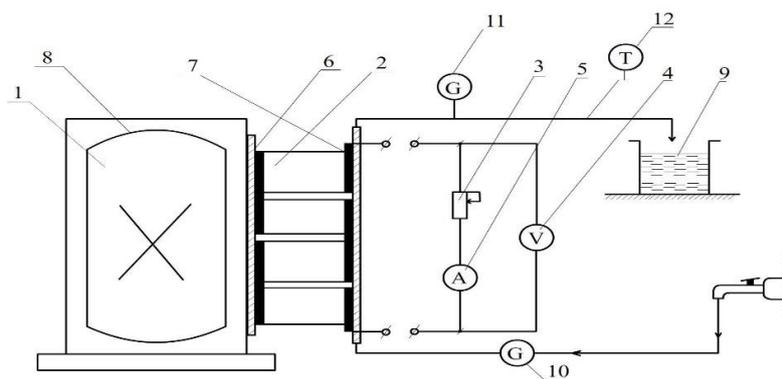
ishonchliliği va amaliyotga joriy etilganligi, ilmiy ishning aprebatziya natijalari, e'lon qilingan ishlar va dissertatsiyaning tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Termoelektrik energetikani rivojlanish bosqichlari va shu soha tadqiqotlarning hozirgi holati”** deb nomlangan birinchi bobida termoelektrik energetikaning asosini tashkil etuvchi fizik jarayonlar va ular asosida ikkilamchi issiqlik energiyasi manbalaridan foydalanish orqali energetik yo'qotishlarini oldini olish hozirgi paytning asosiy vazifalaridan biri ekanligi, undan elektr energiya manbai sifatida foydalanish energiya tanqisligi o'rin tutgan bir paytda ijobiy yechim bo'lishi ko'rsatib berilgan. “Termoelektrik effekt” xodisasi kashfiyotchisi Zeyebek effektidan foydalanib dunyo va mamlakatimiz olimlari tomonidan bajarilayotgan ishlar, ularning ixtiro va yangiliklarini ko'rsatib berilgan. Mavjud eksperimental va nazariy ma'lumotlar tahlillari asosida tadqiqotlar muammosi va vazifalari belgilangan.

Dissertatsiyaning **“Sanoatda termoelektrik batareyalardan foydalanish-dagi muammolar, ularni yechimlari va nazariy tadqiqotlar”** deb nomlangan ikkinchi bobida oldinga qo'yilgan maqsad-ishlab chiqarish korxonalari uchun mo'ljallangan termoelektrik batareyalarni yaratish maqsadida tadqiqot ishlarini dastlabki qadamlari mamlakatimizda faoliyat ko'rsatayotgan o'nlab ishlab chiqarish korxonalarida ishlatilayotgan, va ko'proq behuda tashlanib yuborilayotgan issiqlik energiyasidan elektr energiyasini olish, hamda energiya tanqisligi tufayli aholi noroziliklariga sababchi bo'layotgan qishloq, tog' hududi, sahro va cho'l hududlarida istiqomat qiluvchi fuqarolar ehtiyojini qondiruvchi avtonom energiya manbalarini energetik va ekspluatasion parametrlarini aniqlash, texnologiyasini takomillashtirish, yoki yangi usullarni topish maqsad qilib qo'yildi.

Tadqiqotda mavjud batareya texnologiyalari tahlil qilinib, ulardan eng sodda va iqtisodiy jihatdan maqbullari ajratib olindi. Termoelementlar termoelektrik generatorlarda sanoat chiqindi issiqligi, ichki yonish dvigatellari yoki gaz turbinasi kabi manbalardan olinadigan issiqlikni elektr energiyasiga aylantiruvchi asosiy elementlar hisoblanadi. Shu sababli mavjud ixtirolar va texnologik yechimlar samaradorligi baholandi.

Amaliy qo'llanishga mo'ljallangan termogeneratorlar uchun hisoblash va parametrlarni baholash metodi ishlab chiqildi. Bunda material xossalari, geometrik o'lchamlar hamda elektr-issiqlik bog'liqliklari e'tiborga olindi. Termoelektrik energetika rivojlanayotgan bo'lsa-da, mavjud adabiyotlarda TEG



1-rasm. Termoelektrogenerator qurilmasini yordamchi ekspluatasion konsntruksiyalarga hamda elektr zanjirga ulanish sxemasi

hajmi bo'yicha issiqlik jarayonlari yetarli darajada yoritilmagan. Shu bois qurilma konstruksiyasi nazariy hisoblashlarga asoslanib ishlab chiqildi va uning elektr zanjirga ulanish sxemasi taklif qilindi (1-rasm).

Qurilmaning asosiy elementlari: 1 – issiqlik manbai (kimyo sanoati rezervuari, ishchi harorat $T_{ish}=140\text{ }^{\circ}\text{C}$ gacha), 2 – TEG, 3 – yuklama, 4 – voltmetr, 5 – ampermetr, 6–8 – termoparalar, 9 – sovuq suv rezervuari, 10–11 – suv sarfini o‘lchash asboblari, 12 – ishlatilgan suv trubasi. Qurilma ishlash prinsipi selitra ishlab chiqarish jarayonida hosil bo‘ladigan $110\div 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratli chiqindi issiqlikdan foydalanishga asoslanadi. Issiqlik manbai sifatida rezervuar yuzasi tanlanib, unga KTP-8 pastasi orqali TEG issiq uchlari biriktirildi.

TEG yer sathidan 25 sm balandlikda joylashtirilganligi bois, sovuq uchlari sinib ketmasligi uchun sovutish trubasi yerga tayanch qilib o‘rnatildi. Hisoblashlarda quyidagilar qabul qilindi: TEG elementlari yuzasi to‘g‘ri to‘rtburchak shaklda, issiqlik uzatuvchi yuza tekis, issiq uchlari temir kommutatsion plastinalar orqali issiqlikni yaxshi o‘tkazuvchi va elektr izolyatsiyalovchi keramik plastinaga KTP-6 pastasi yordamida mahkamlangan. Rejalashtirilgan TEG materiali – BiSbTe (p-tip) va BiTeSe (n-tip) bo‘lib, termoelementlar haqidagi ma’lumotlar jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Materiali	O‘lchamlari		Elektrofizik hususiyatlari		
	Uzunligi mm	Qirqimi mm^2	α (mkv/grad)	ρ ($\text{om}\cdot\text{sm}$)	ε (Vt/sm·grad)
BiSbTe (p-tip)	14	4 x 4	218	1,031	15,3
BiTeSe (n-tip)	14	4 x 4	234	0,205	14,1

Hisoblashlar jarayonida issiqlik parametrlari ham aniqlandi. Bu masalani yechishda asosiy formulalar sifatida issiqlikni muvozanati hamda issiqlikni uzatishni ifodalardan foydalanildi:

$$Q = C_{CF} \cdot \Delta T_n = C_{CC} \cdot \Delta T_c \quad (1)$$

$$Q = k \cdot \Delta T \cdot F_{iyu} \quad (2)$$

$$\Delta T = \left(\frac{T'_n - T''_n}{2} - \frac{T'_c - T''_c}{2} \right) \quad (3)$$

Bu yerda Q-issiqlik manбайдan TEG ning issiq uchlari berilayotgan issiqlik miqdori; ΔT_n - TEGning kirish va chiqishida issiqlik tashuvchining issiq haroratlar farqi (k) ΔT_c - sovutish uchun issiqlikni olib ketayotgan suvning TEG ni sovuq uchlari kirish va chiqishdagi farqi (k); $\overline{\Delta T}$ issiq va sovuq issiqni tashuvchi o‘rtasidagi temperatura bosimi, (k); F_{iyu} - issiqlik almashinadigan yuza, (m^2); T'_u, T''_u, T'_s, T''_s - issiqlik tashuvchilarning kirishi va chiqishidagi issiq va sovuq haroratlari, k.

Issiqlik muvozanati tenglamasi (3) dan foydalanib

$$\begin{cases} T''_n = T'_n - \frac{Q}{C_{sg}}, \\ T''_c = T'_c - \frac{Q}{C_{ss}}, \end{cases} \quad (4)$$

ni aniqlaymiz.

Topilgan qiymatlarni (3) tenglamaga qo‘yib, o‘rtacha haroratlar bosimini aniqlash mumkin.

$$\overline{\Delta T} = (T'_H - T'_C) - \left(\frac{1}{2C_{sg}} + \frac{1}{2C_{sg}} \right) \quad (5)$$

Oxirgi olingan ifodani issiqlik uzatish tenglamasiga qo'yib, issiqlik o'tkazuvchanlikka nisbatan masalani yechish mumkin.

$$Q = \frac{T'_i - T'_s}{\frac{1}{\alpha \cdot F_{iyu}} + \frac{1}{2C_{sg}} + \frac{1}{2C_{sg}}} \quad (6)$$

(6) formulaga kiritilgan parametr

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{h_{dev}}{\alpha_{dev}} + \frac{h_m}{\alpha_m} + \frac{h_{dev}}{\alpha_{dev}} + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (7)$$

χ - issiqlik uzatish koeffitsiyenti.

Ψ_i - issiq tomondagi issiqlik tashuvchiing issiqlik koeffitsiyenti. Bu parametr kovektiv usulda Ψ_k va nurlanish orqali issiqlikni uzatishni Ψ_n yig'indisidan iborat.

$$\Psi_H = \Psi_K + \Psi_M \quad (8)$$

$$\Psi_K = \frac{Nu_i \cdot \alpha_i}{d_1} \quad (9)$$

bu yerda Nu_i - issiq uchlaridagi issiqlikni tashuvchi uchun Nusselt mezonini bo'lib, bu kattalik Reynolds soniga bog'liq. Reynolds soni esa nov ichidagi issiqlik tashuvchining harakatlanish hususiyatiga bog'liq:

$$Re_{eu} = \frac{w_u \cdot d_1}{\gamma_u} - \text{Reynolds soni.} \quad (10)$$

(10) ifodadagi $w_u = \frac{G_u}{\rho_u \cdot F_{qirq}}$ - issiq tomondagi nov ichidagi issiqlik tashuvchining harakat tezligi, m/s;

Nurlanish orqali issiqlik o'tkazuvchanlik

$$\Psi_H = \varepsilon \cdot C_0 \cdot 10^{-8} \left(\frac{T_u^4 - T_{dev1}^4}{T_u - T_{dev1}} \right) \quad (11)$$

ga teng. Bu ifodadagi ε - issiqlik almashish tizimining keltirilgan qoralik darajasi, $Vt/(m^2 \cdot k^4)$, C_0 - $5,67 Vt/(m^2 \cdot k^4)$ - absolyut qora jismning nurlanish koeffitsiyenti; T_{dev1} - issiq tomondagi issiqlik tashuvchini devorini harorati, K.

TEG ni sovuq uchlarini suv bilan sovutilayotgan tomondagi issiqlik berish koeffitsiyenti

$$\Psi_C = \frac{Nu_c \cdot \alpha_c}{d_{kel}} \quad (12)$$

Bu yerda $d_{kel} = \sqrt{\frac{4F_{sov}}{3,14}}$ novsimon sovutish tizimini ko'ndalang qirqimini keltirilgan diametri, m; F_{sov} - sovutgichni o'tish qirqimi yuzasi, m^2 ; Nu_s - sovuq uchlarga ulangan issiqlik tashuvchi uchun Nusselt mezonini.

Nusselt mezonini aniqlash uchun sovutgichdagi ishchi agentni (suvni) harakatlanish rejimini aniqlash zarur:

$$Re_e = \frac{w \cdot d_{kel}}{\gamma_c} \quad (13)$$

Bu yerda $w = \frac{G_c}{\rho_s \cdot F_{sov}}$ - ishchi agentni nov ichidagi bo'shliqdagi harakat tezligi, m/s.

(6) formula orqali topilgan issiqlik miqdori Q ning qiymatini (4) tenglamaga qo'yib, issiqlik tashuvchini oxirgi haroratini aniqlashda foydalanish mumkin.

Novdan ishchi agent oqayotgan tomondagi devorlarini harorati, D_j ,

$$Q_1 = \Psi \cdot F_{\text{dev1}} \cdot (T_u - T_{\text{dev1}}) \quad (14)$$

Energiyani saqlanish qonuniga ko'ra, (6) va (13) formulalarda ko'rsatilgan issiqlik miqdorlari bir biriga tengdir. (13) formuladan devor haroratini topamiz, K:

$$T_{\text{dev1}} = T_u - \frac{Q_1}{\Psi_u \cdot F_{\text{dev1}}} \quad (15)$$

oxirgi ifordada F_{dev1} - novning ichki yuzasini maydoni, m^2 .

Issiqlikni beruvchi novning tashqi deametri yuzasi bo'yicha devoridagi harorat, issiqlik uzatishning

$$T_{\text{dev2}} = T_{\text{dev1}} - \frac{Q_1}{2 \cdot F_{\text{dev1}} \cdot \alpha_{\text{dev}}} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \quad (16)$$

Formulasi orqali aniqlandi, K. oxirgi formulada $d_2 = d_1 + 2h_{\text{dev}}$ - issiq uchdagi novning tashqi diametri, m.

Termoelementning issiq uchlari harorati

$$T_{\text{dev3}} = T_{\text{dev2}} - \frac{Q_2}{2 \cdot F_{\text{dev2}} \cdot \alpha_{\text{ker}}} \cdot \ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right) \quad (17)$$

Bu yerda $d_3 - d_2 + 2\alpha_{\text{ker}}$ - keramika qatlamini qalinligini hisobga olgan hol uchun novning diametri, m.

Elektr hisoblashlarni amalga oshirishda zarur bo'lgan parametrlardan biri T_{dev3} bo'lib, u termoelektrik modulning issiq uchlariidagi haroratni bildiradi.

Endi shu issiq uchlari tomonga oqib o'tadigan issiqlik miqdorini aniqlanishi zarur. U

$$Q_2 = \frac{\alpha_{\text{dev}}}{h_{\text{dev}}} \cdot F_{\text{dev2}} \cdot (T_{\text{dev2}} - T_{\text{dev3}}) \quad (18)$$

Orqali topilishi tavsiya etiladi.

Aynan bu jarayonda sovuq uchlardagi harorat qiymati haqidagi ma'lumot ham darkor bo'ladi. Buning uchun dastlab issiq va sovuq uchlari o'rtasidagi haroratlar farqini quyidagi ifoda orqali

$$\Delta T_3^2 \cdot \frac{Z_{\text{TE}}}{2 \cdot (1+m^2)} - \Delta T_{\text{TE}} \left(1 + \frac{Z \cdot T_{\text{TE}}}{1+m}\right) + \frac{Q_3 \cdot l}{(S_p \cdot \alpha_p + S_n \cdot \alpha_n)} = 0 \quad (19)$$

Yozib olamiz. Ma'lumki bu yerda Z_{TE} - termoelementning samaradorligidir, $1/K$; $m = \frac{R_n}{R_m}$ - nisbiy foydali yuklama.

Agar, bordiyu, texnologik ishlab chiqarishda termoelektrik modulni o'rnatish jarayonida qo'shimcha yordamchi qatlamlar orqali issiqlik manbaiga ulash zarurati tug'ilgudek bo'lsa, u holda har bir qo'shimcha qatlam haroratini

$$T_{\text{devi}} = T_{\text{devi-1}} - \frac{Q}{2 \cdot F_{\text{devi-1}} \cdot \alpha_{\text{devi-1}}} \cdot \ln\left(\frac{d_i}{d_{i-1}}\right) \quad (20)$$

Formula orqali aniqlash imkoniyati mavjud. Modellashtirishda va TE lardan yig'ilgan TEG ni ekspluatatsiya sharoitlariga moslashtirish masalasi ham nazarda tutilgan.

Aynan shu maqsadda kerakli har bir qatlamdan o'tadigan issiqlik miqdorini

$$Q_i = \frac{\alpha_i}{h_i} \cdot F_{\text{devi}} (T_{\text{devi-1}} - T_{\text{devi}}) \quad (21)$$

Orqali aniqlash imkoniyati mavjud.

Termoelektrogeneratorlarning elektr parametrlarini hisoblashda bir nechta metod uyg'unlashtirildi. Bunda nafaqat asosiy elektr kattaliklari, balki yuklama toki I_{yu} ning termoelement shoxchalari bo'ylab optimal qiymat I_{opt} dan og'ishi ham aniqlanadi.

Chunki I_{yu} ning I_{opt} ga yaqinligi foydali ish koeffitsiyenti yutqazilishini baholash imkonini beradi.

Shunday qilib, termoelektrik modulning Zeyebek koeffitsiyenti, V/K,

$$E=2 \cdot N \cdot \alpha \quad (22)$$

Bu yerda N - maket tarkibiga kiritiladigan termojuftlarning soni; α - termoelementlarning termoelektrik yurituvchi kuchi, V/K.

Issiqlik va sovuq uchlardagi haroratlar farqi, K:

$$\Delta T_{TE} = T_{dev3} - T_{dev2} \quad (23)$$

Termoelektr yurituvchi kuch kuchlanishi, V:

$$E_{TEG} = E \cdot \Delta T_{TE} \quad (24)$$

Bir juft moduldagi tok kuchi

$$I = \frac{E \cdot \Delta T_{TE}}{R_m \cdot (1+m)} \quad (25)$$

Tashqi yuklamaga tushayotgan kuchlanishlar, V:

$$U = E \cdot \Delta T_{TE} \cdot \frac{m}{1+m} \quad (26)$$

va, shunga mos holda, tashqi zanjirdagi yuklama uchun ajratib chiqarilayotgan quvvat:

$$p = \frac{E^2 \cdot \Delta T_{TE}^2}{R_m} \cdot \frac{m}{(1+m)^2} \quad (27)$$

Tashqi yuklama uchun ajratib ishlab chiqarilib berilayotgan foydali ish miqdori, termodinamika qonuniga asosan, Vt [3].

$$W = Q_3 - Q_i \quad (28)$$

To'g'ridan to'g'ri issiqlik energiyasini elektr energiyasiga aylantirishdagi siklning termik F.I.K.i

$$\eta = \frac{W}{Q_3} \quad (29)$$

Aynan termoelektrik generatorning f.i.k.i.

$$\eta_i = \frac{\Delta T_{TE}}{T_{dev3}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{m} + \frac{1}{Z_{TE} \cdot T_{dev3}} \cdot \frac{(m+1)^2}{m} \cdot \frac{\Delta T}{Z_{TE} \cdot T_{dev3} \cdot m}} \quad (30)$$

Dissertatsiyaning “**(Bi₂Sb)Te₃ va (Bi₂Te₃)Se asosidagi termogeneratorlarni elektrofizik parametrlarini va ekspluatasion konstruksiyalarini modellashtirish orqali tadqiqot qilish**” deb nomlangan uchinchi bobida, modellashtirish orqali, issiqlik va elektr parametrlarni termoelektrogenerator uchun amalga oshirishda turli xil rejimlar uchun bajarildi. Bunda 1NVD2Y dvigateli ishi uchun, har birining ichki qarshiligi 350 Om dan bo'lgan 8 ta yoritgich uchun manba vazifasida qo'llanilishi nazarda tutildi. TEG ning shoxchalarini uzunligi 0,14 m ni tashkil etib, 8 juft TE ketmaket ulangan. Uni elektr parametrlari $\Delta T=100$ °C da $U=7,50$ dan $12,5$ V gacha, tok $I=0,005$ dan $0,02$ A gacha, quvvati esa $w=0,23$ dan $0,5$ Vt gacha berdi.

Hisoblashlar asosida issiqlik tashuvchini (sovuq uchlaridagi suv oqimini) sarf bo'lishi, suvni oqishini ta'minlovchi dvigatelni yuklamasiga bog'liq ravishda o'zgarishi natijalari olindi (2-jadval)

% Ne	$G_{\text{sov}} \text{ m}^3/\text{s}$	$G_{\text{sov}} \text{ m}^3/\text{soat}$
80	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,032
60	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,117
40	$8,4 \cdot 10^{-5}$	0,314
20	$2,2 \cdot 10^{-5}$	0,818
10	$0,5^5$	1,534
Salt ishlash	-	-

Materialni chiziqli kengayishini bildiruvchi harorat koeffitsiyentini tellurid vismuti qorishmasi asosidagi materiallar uchun ikki xil yo‘l orqali aniqlandi. Birinchi usulda $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Se}$ (n-tipli) birikma hosil bo‘lishi uchun va ikkinchi shunday qattiq kvazibinar qorishma $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$ larni ideal holatidan uncha farq qilmasligini ehtimolligiga asoslanib olib borildi. (2.27) formulada chiziqli kengayish koeffitsiyenti δ_L uni tashkil etuvchilari δ_a va δ_c dan iborat ekanligi quyidagi munosabatlardan aniqlanadi:

$$\delta_a = \delta_L + (3c)^{-1} a \left[\frac{d\left(\frac{a}{c}\right)}{dT} \right] = \delta_L + \frac{\delta_a - \delta_c}{3} \quad (31)$$

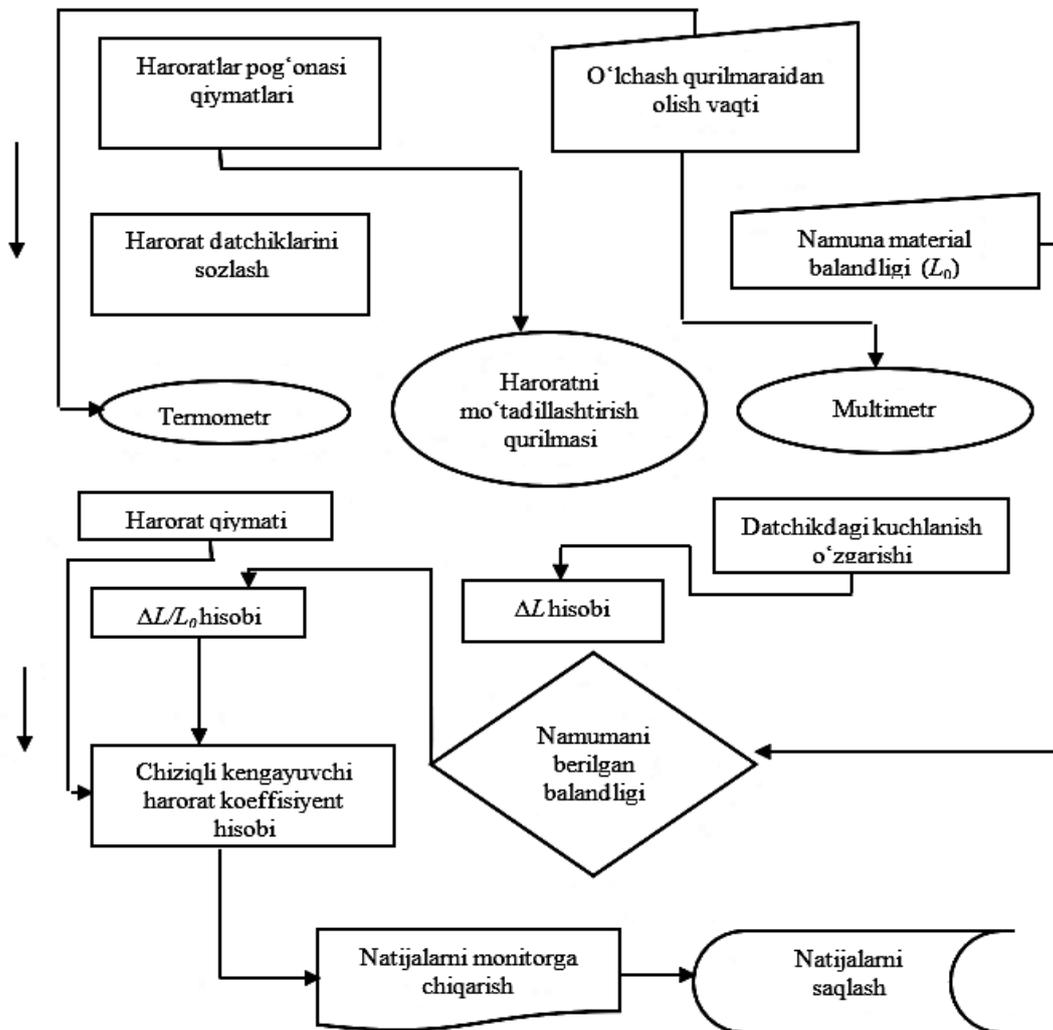
va

$$\delta_c = \delta_L + \left(\frac{2a}{3c}\right) \left[\frac{d\left(\frac{a}{c}\right)}{dT} \right] = \delta_L - \frac{2(\delta_a - \delta_c)}{3} \quad (32)$$

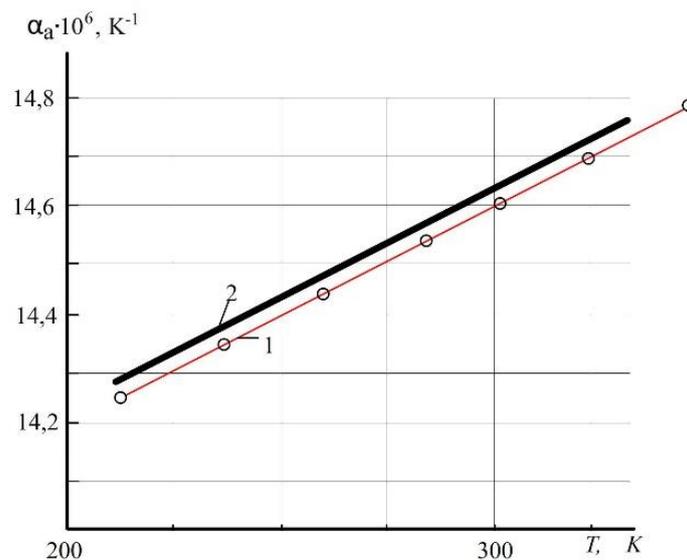
Yuqoridagi ifodalar yordamida $\delta_L = f(T)$, $\delta_a = f(T)$ va $\delta_c = f(T)$ bog‘liqliklar aniqlanib past ishchi haroratlarda ishlaydigan samarador n-o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan Bi_2Te_3 asosidagi termoelektrik materiallar xaqida ma‘lumotga ega bo‘lindi. 2-rasmda Bi_2Te_3 asosidagi termoelektrik materiallarni chiziqli kengayuvchi harorat koeffitsiyentini tadqiqot qilish uchun dastur algoritmi sxemasi va 3÷6 rasmlarda natijalar keltirilgan.

Aniqlanishicha, ushbu materiallarning qatlam tuzilmalari ichidagi kimyoviy bog‘lanishlari hususiyatlariga ko‘ra, chiziqli kengayuvchi harorat koeffitsiyenti “a” va “c” kristallografik o‘qlari bo‘yicha aniq anizotropik tavsifga ega ekan. Uni murakkab qatlamlar to‘plami sifatida, ya‘ni “c” kristallografik o‘qqa nisbatan perpendikulyar bo‘lgan atom kvintetlari ko‘rinishida tasavvur qilish mumkin. Termogeneratorni konstruksiyasini ishlab chiqish, generator elementlari uchun materiallarni parametrlarini aniqlash ishlari COMSOL Multiphysics dasturda modellashtirish orqali amalga oshirildi. Olingan natijalar 7,8-rasmda keltirilgan.

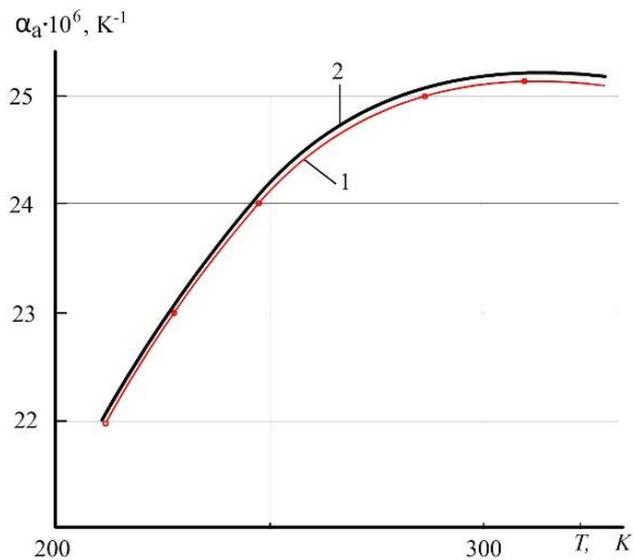
Yuqoridagi grafiklardan ko‘rinib turibdiki, termogenerator elementlarining balandligi 6 mm dan oshirilgandan so‘ng tok kuchining qiymatlari pasayib bormoqda. Kuchlanish va quvvat esa o‘zining o‘rtacha qiymat ko‘rsatkichlariga ega bo‘lmoqda. Mana shu holatlarni inobatga olgan holda termogenerator elementlarining balandligini 6 mm qilib konstanta holatda qoldirib termogenerator elementlarining yuzasini 9 mm^2 dan 36 mm^2 gacha o‘zgartirib borish orqali optimal o‘lchamlar aniqlangan.



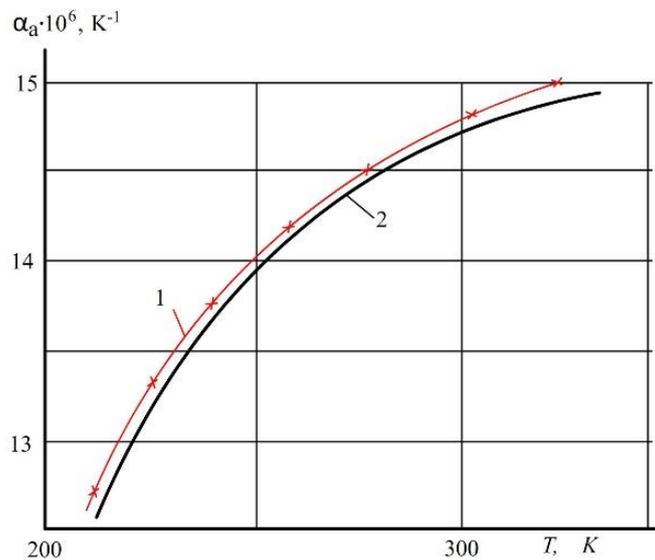
2-rasm. Chiziqli kengayish harorat koeffitsiyentini hisoblash dasturi algoritmi



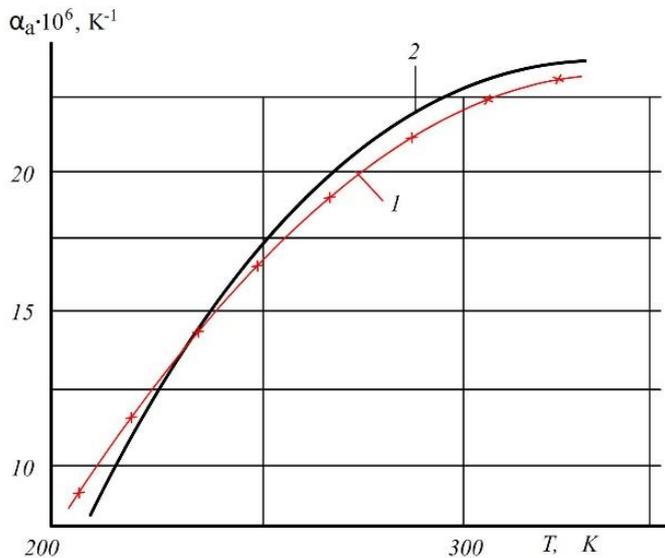
3-rasm. Bi₂Te_{2,88}Se_{0,12} ning "a" o'qi bo'ylab termal kengayish koeffitsiyentini haroratga bog'liqligi. 1-dissertatsiya muallifi natijalari, 2-Yu.I. Shtern ilmiy natijalari.



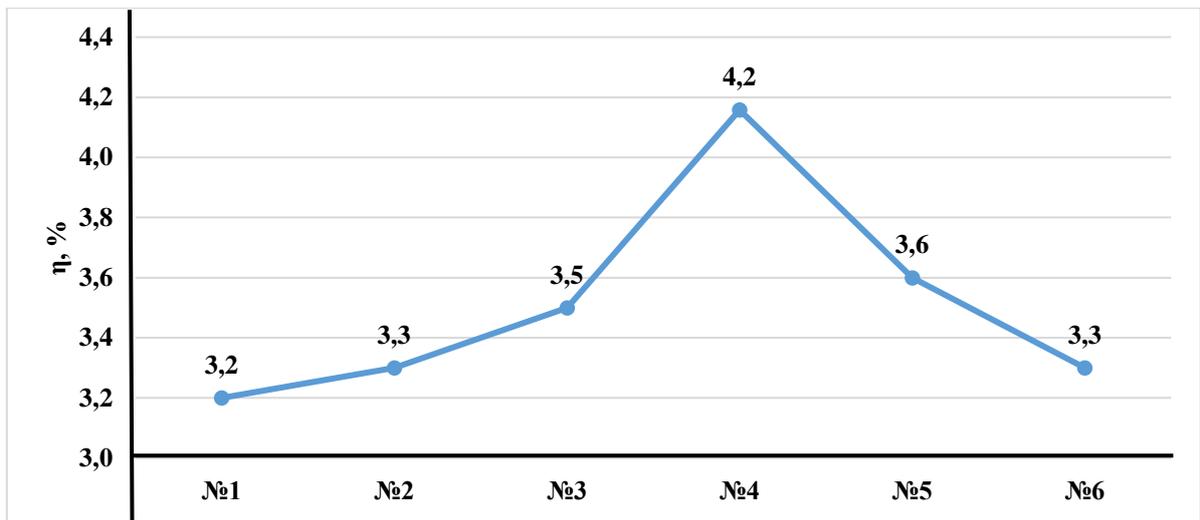
4-rasm. $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,88}\text{Se}_{0,12}$ ning “c” o‘qi bo‘ylab termal kengayish koeffitsiyentini haroratga bog‘liqligi. 1-dissertatsiya muallifi natijalari, 2-Yu.I. Shtern ilmiy natijalari.



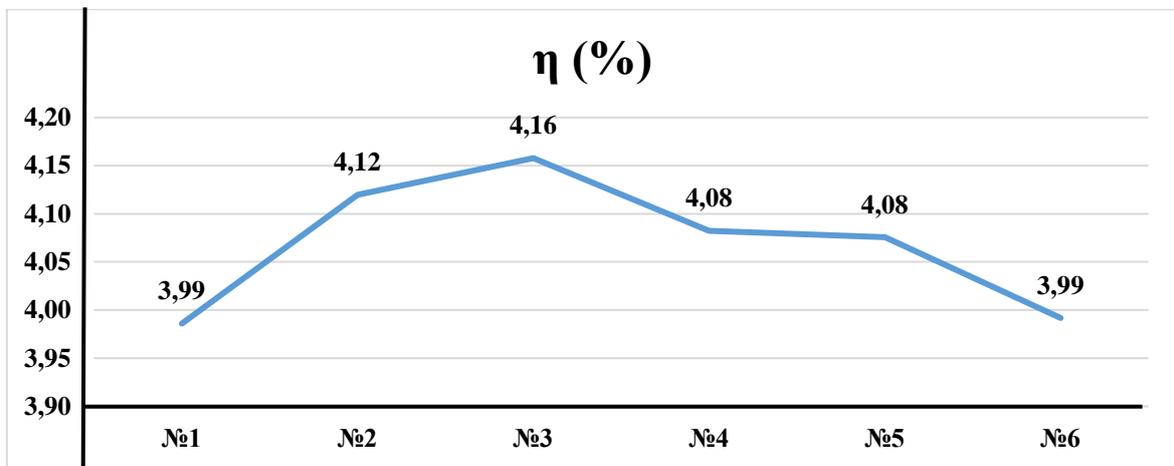
5-rasm. $\text{Bi}_{0,52}\text{Sb}_{1,48}\text{Te}_3$ ning “a” o‘qi bo‘ylab termal kengayish koeffitsiyentini haroratga bog‘liqligi. 1-dissertatsiya muallifi natijalari, 2-Yu.I. Shtern ilmiy natijalari.



6-rasm. $\text{Bi}_{0,52}\text{Sb}_{1,48}\text{Te}_3$ ning “c” o‘qi bo‘ylab termal kengayish koeffitsiyentini haroratga bog‘liqligi. 1-dissertatsiya muallifi natijalari, 2-Yu.I. Shtern ilmiy natijalari.



7-rasm. Termoelektrik generatorning F.I.K. ni shoxchalar balandligiga bog‘liqligi



8-rasm. Termoelektrik generatorida F.I.K ining element ko‘ndalang kesim yuzasiga bog‘liqligi

Modellashtirish orqali olingan natijalar «KRIOTERM» OAJ ning TGM-127-1,4-2,5 termoelektrik moduli tajriba sinov natijalari bilan taqqoslandi.

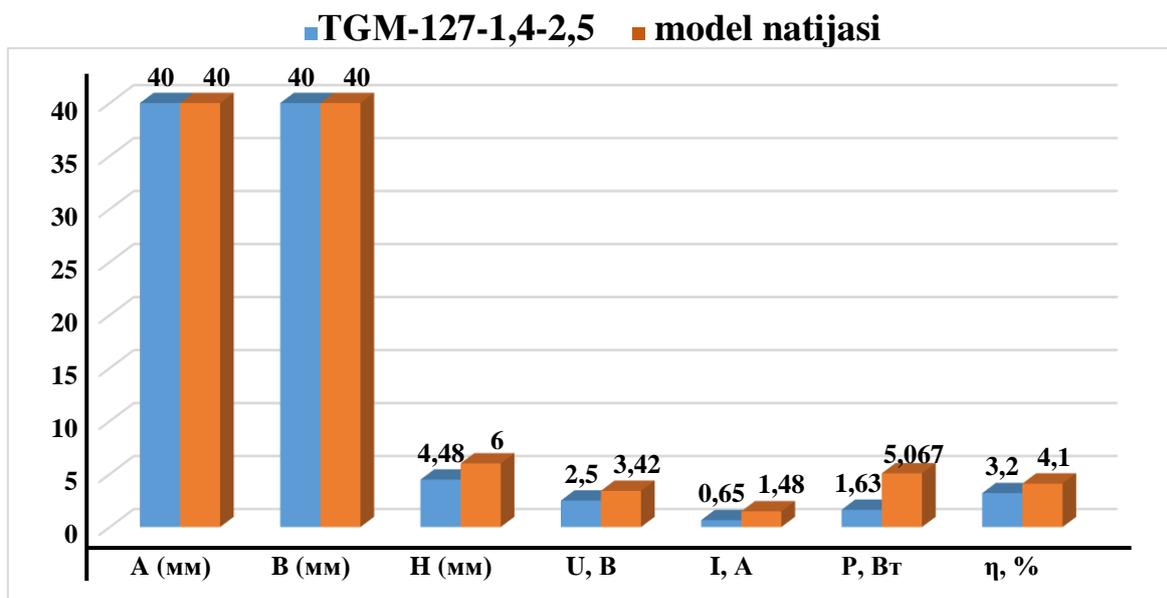
3-jadval.

Nomi	Geometrik o‘lchamlari, mm			U, V	I, A	R, Vt	η, %
	A	B	H				
TGM-127-1,4-2,5	40	40	4.8	2.5	0.65	1.63	3.2
Model natijasi	40	40	6	3.42	1.48	5.067	4.1

Jadval qiymatlaridan ko‘rinib turibdiki, modellashtirish jarayonida olingan natijalar TGM-127-1,4-2,5 dan samaraliroq ekan. Jumladan F.I.K 0.9% ga yaxshilanganligini ko‘rishimiz mumkin. Ushbu xolatni termoelektrik generatorni modellashtiriyotganda uning samaradorligini geometrik o‘lchamlariga naqadar bog‘liqligi orqali izohlash mumkin. Ya’ni termoelektrik generator elementlarini

nafaqat uning balandligiga balki uning ko'ndalang kesim yuzasiga xam bog'lik ekanligini ko'rish mumkin. Shu nuqtai nazardan modellashtirish davomida ko'ndalang kesim yuzasini ham turli qiymatlarda o'zgaruvchi sifatida qabul qilib natijalar olinib taqqoslandi(9-rasm).

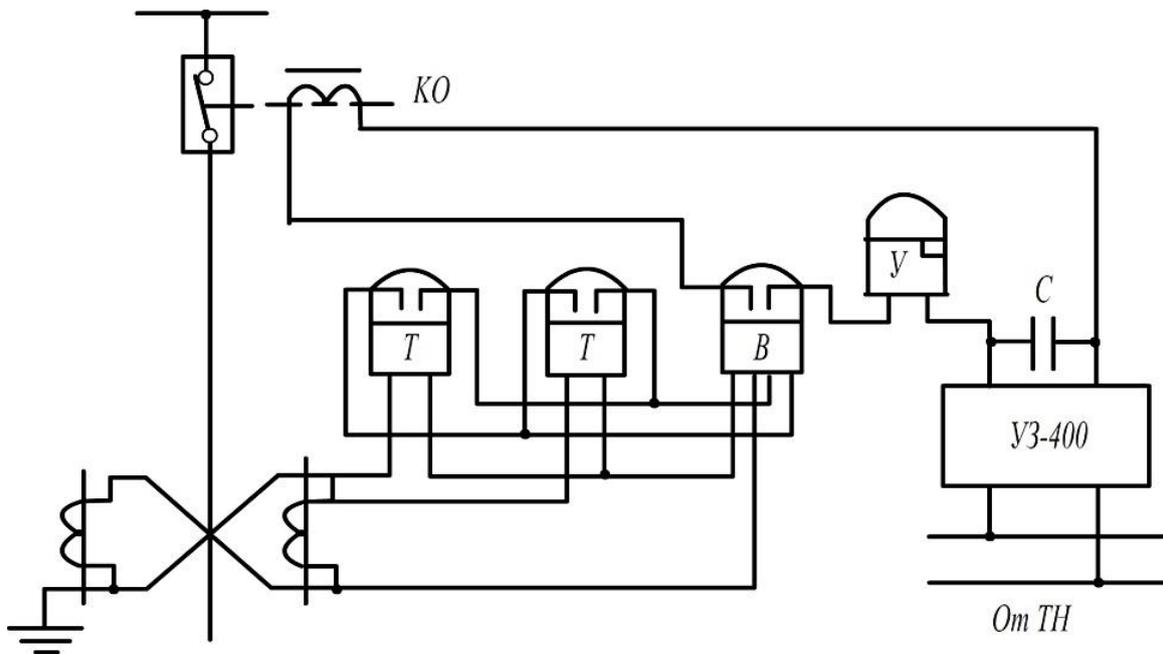
Oxirgi "p-BiSbTe n-BiTeSe va Si (kremniy) asosidagi termoelektrogeneratorlarni eksperimental tekshirish, natijalar tahlili va tavsiyalar" nomli to'rtinchi bobda nazariy va amaliy tadqiqotlar asosida tayyorlangan termoelektrik generatorlarni sanoat korxonalarida eksperimental tekshirish va olingan natijalarni tahlil qilish ishlari bajarilgan. Termoelement shoxchalarini tayyorlash elektroerozion qurilmada (10 - rasm) amalga oshirilib, uni kinematik sxemasi 11-rasmda ko'rsatilgan.



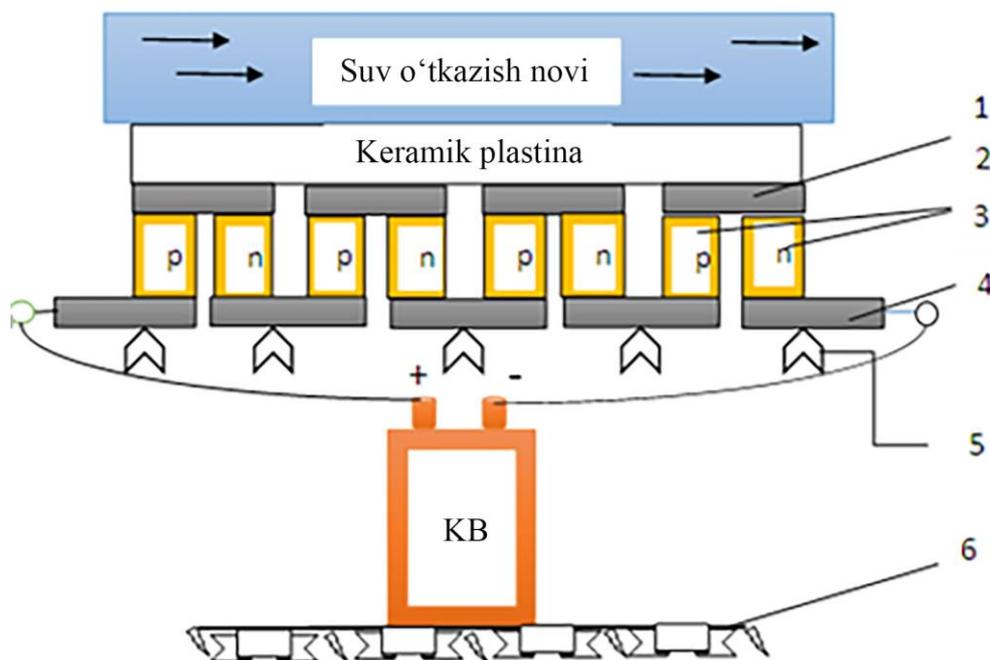
9-rasm. Modellashtirish orqali olingan natijalarni «KRIOTERM» OAJ ning TGM-127-1,4-2,5 [149, -135 b.] termoelektrik moduli tajriba sinov natijalari bilan qiyosiy tahlili



10-rasm. Elektroerozion qurilma.



12-rasm. Zaryadlangan kondensatordan oziqlantirilayotgan maksimal tok himoyasining sxemasi



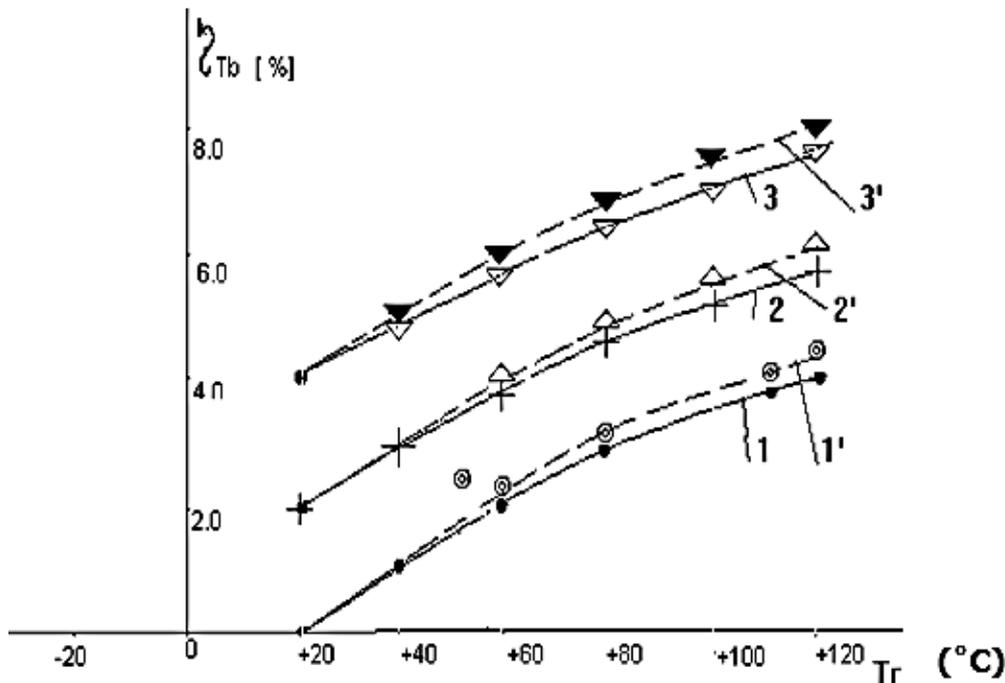
13-rasm. TBlarni kondensator batareyasiga ulanish sxemasi.

13-rasmda 1, 4-mos holda, TELarning issiq va sovuq uchlaridagi kommutasion plastinalar (Fe va Ni), 3-p – va n-tipli termoelementning yarim shoxchalari (Bi_2Te_3 – BiSb_3 Bi_2Te_3 – Bi_2Se_3), 5-TB ni ko'tarib turish uchun taxta tirkamalar, 6-KB turgan yer sathi.

Eksperimentda kondensator batareyasini zaryadlash uchun TEG qo'llanildi (13-rasm). Tajribada TEGdan oqayotgan tok va chiqish kuchlanishi elektr o'lchash asboblari bilan nazorat qilinib, o'ziyozuvchi qurilma yordamida diagrammalar shaklida qayd etildi. Suv oqim tezligi barqaror bo'lgani sababli uch kunlik sinov

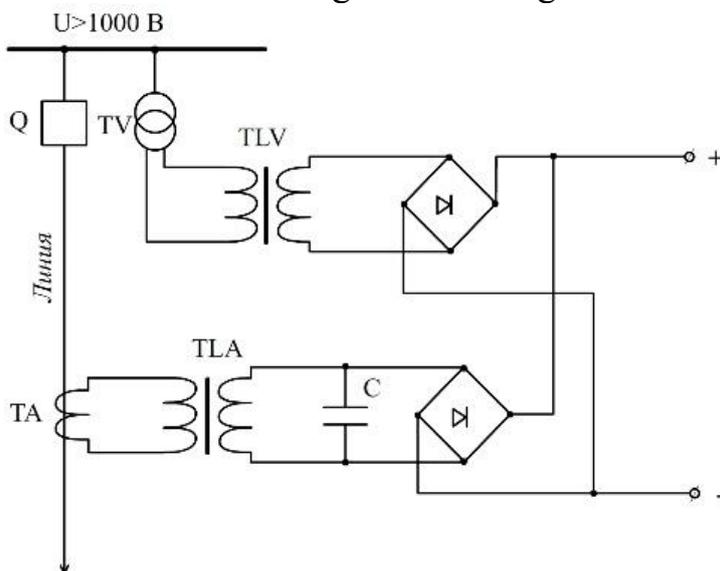
davomida suv harorati farqi $\approx 1,0 \div 1,4\%$ dan oshmadi. To'liq zaryadlash vaqti 45 minut, rele himoyasi ishga tushgach qoldiq zaryadni tiklash vaqti 3 minutni tashkil etdi, bu ishonchlilik talablariga javob beradi.

14-rasmda TEGning foydali ish koeffitsienti issiq uchlar haroratiga bog'liqligi ko'rsatilgan bo'lib, u eksponensial xarakterga ega va adabiyotlarda keltirilgan natijalar bilan mos keladi.

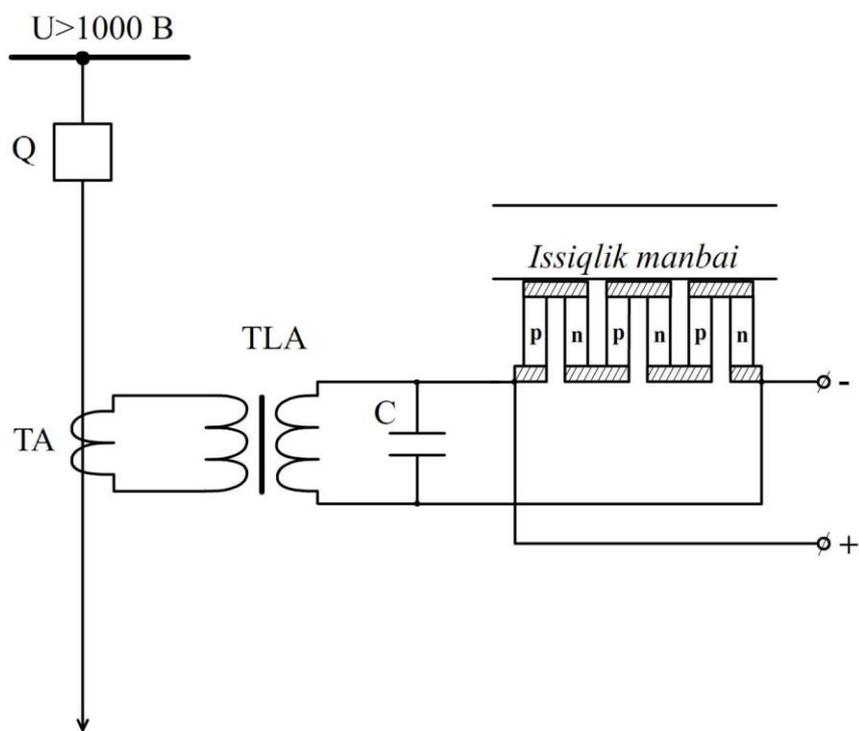


14-rasm. Termobataryaning f.i.k. ini uni sovuq uchlaridagi haroratni o'zgarishiga bog'liqligini ko'rsatuvchi grafik. 1,1'- $T_s = +20^\circ\text{C}$; 2,2'- $T_s = -20^\circ\text{C}$; 3,3'- $T_s = -60^\circ\text{C}$; Punktir chiziqlarda modellashtirish orqali nazariy hisoblashlar qiymati, uzluksiz chiziqlarda esa tajriba natijalari keltirilgan.

Keyingi eksperiment akkumulator batareyalari (KB) ni zaryadlash ustida o'tkazildi. 15-rasmda KBni o'lchash transformatorlari va to'g'rilash bloki yordamida zaryadlash va 16-rasmda esa ularni TEGga almashtirilgan sxemalari ko'rsatilgan.



15-rasm. KB ni o'lchash transformatorlari va to'g'rilash bloki yordamida zaryadlash.



16-rasm. KB ni termobatareya orqali zaryadlash

XULOSALAR

Olib borilgan ilmiy tadqiqot, loyiha - konstruktorlik va tajriba-sinov ishlarining natijalari bo'yicha dissertatsiya ishiga quyidagi xulosalar qilindi:

1. Termoelektrik energetika muqobil energiyalar manbaining biri bo'lib, fan va texnikaning turli sohalarida keng qo'llanilganligiga qaramay, hozirgi kunda sanoat korxonalarining ehtiyojlari uchun qo'llanilmagan va undan energotizim ehtiyojlari uchun maqbul kichik va o'rta quvvatda ishlashga mo'ljallangan termobatareyalar ishlab chiqildi.

2. Termoelektrik batareyalarni energotizim ehtiyoji uchun ishlab chiqarishda, past haroratli termoelektrik materiallar ichidan BiTe-BiSb aralashmasi asosida TeI₄ bilan legirlangan, termoelektrik samaradorligi $Z=3 \cdot 10^{-3} \text{ grad}^{-1}$ ga teng bo'lgan materiallardan foydalanish maqsadga muvofiqligi aniqlandi.

3. Modellashtirish usuli orqali termoelektrik materiallarning tarkibi, samaradorligi, geometrik o'lchamlari, ishchi hamda ekspluatasion parametrlari yuqori aniqlilikda hisoblanib barcha izlanayotgan xususiyatlar bo'yicha aniq ma'lumotlar olish imkoniyati yaratildi.

4. Ishlab chiqilgan BiSb - BiTe asosidagi dastur termoelektrik generatorlarni materiallarini samaradorligini aniqlashga va uni quvvati hamda elektrofizik parametrlarini baholash imkoni ta'minlangan.

5. 120 Kvar quvvatga ega bo'lgan kondensator batareyalari 40 ta termoelementdan tashkil topgan batareya yordamida zaryadlash vaqti, $\Delta T=100^{\circ}\text{C}$ ni tashkil etganida, 1 s 47 minutni tashkil etishi aniqlandi.

6. Ilk bor, energotizim uchun, tashlab yuboriladigan texnik suvlar energiyasidan foydalanib, releli himoyalash va avtomatika ishlari uchun operativ tok manbai sifatida ishlovchi TEGlar loyihalandi, samaradorlik shartlari aniqlandi, ishlab chiqildi va sinovdan o'tkazildi.

7. Ilk bor, TEGlardan foydalanish murakkab sxemali, ko'p sonli qimmatbaho jihozlardan foydalangan holda ishlaydigan operativ tok zanjiri qurilmalari, hamda zaryadlash uskunalariga qaraganda sodda konstruksiyali ekanligi va tejamkorligi ko'rsatib berildi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 ПО
ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАМАНГАНСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ФЕРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

НОРБУТАЕВ МАЪСУДЖОН АБДУРАСУЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ**

01.04.10 – Физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА
ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ.**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам зарегистрирована под B2024.3.PHD/T2839 номером в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

Диссертация выложена в Ферганском государственном техническом университете. Автореферат диссертации размещен на веб-странице Ученого совета (www.namdtu.uz) и Информационно-образовательном портале Ziyonet (www.ziyonet.uz) на трех языках (узбекском, русском, английском).

Научный руководитель: Касимахунова Анархан Мамасадиковна
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Куддашев Оббозжон Хакимович
доктор технических наук, профессор

Алижонов Донёр Дилшодович
доктор философии (PhD) по техническим наукам,
доцент

Ведущая организация: Каракалпакский государственный университет

Защита диссертации состоится «5» декабрь 2025 года в 12⁰⁰ часов на заседании Научного совета по присуждению ученых степеней PhD.03/30.11.2022.FM/T/66/04 при Наманганском государственном техническом университете. (Адрес: 160115, г, Наманган, ул, Касансай 7, Наманганский государственный технический университет, Корпус 6, 1 этаж, зал ученого совета. Тел/факс: (99869) 225-10-07; Факс: (99869) 225-76-75. e-mail: info@namdtu.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре Наманганского государственного технического университета (зарегистрирована под № 85) по адресу: 160103, г. Наманган, ул. И.Каримова 7, Тел. (99869) 234-14-85.

Автореферат диссертации разослан « 21 ». 11 . 2025 года.
(реестр протокола рассылки № 8 от « 21 ». 11 . 2025 г.).



И. Эркабоев
Председатель научного совета по
присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

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

Н.Ю. Шармбаев
Председатель научного семинара
при ученом совете д.ф.-м.н.,
профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. В мире ускоренное развитие промышленности и производства вызывает значительный рост вторичных источников тепловой энергии, что приводит к таким негативным последствиям, как парниковый эффект и глобальное потепление. Применение термоэлектрических преобразователей для превращения вторичной тепловой энергии в электрическую позволяет одновременно снижать экологические риски и получать дополнительную электроэнергию. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка экономически эффективных, технологически простых и высокопроизводительных методов термоэлектрического преобразования.

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на определение оптимального стехиометрического состава полупроводниковых материалов, используемых при производстве термоэлектрических преобразователей, совершенствование технологий их изготовления и расширение областей применения термоэлектрических устройств. Среди приоритетных направлений - разработка технологий высокоточного и эффективного изготовления термоэлектрических генераторных элементов на основе $p\text{-BiSbTe}/n\text{-BiTeSe}$. В этом направлении особое внимание уделяется совершенствованию технологий получения термоэлектрических материалов, состоящих из смесей с электронной и дырочной проводимостью, а также имитационному моделированию конструкции термобатарей с учётом температурной зависимости коэффициентов теплового расширения термогенераторных ветвей.

В Республике Узбекистан проводятся научно-исследовательские работы, направленные на повышение коэффициента полезного действия термоэлектрических преобразователей за счёт введения различных легирующих добавок в состав полупроводниковых материалов, а также на их применение в маломощной энергетике. В Указе Президента Республики Узбекистан от 9 сентября 2022 года № ПФ-220 «О дополнительных мерах по внедрению энергосберегающих технологий и развитию маломощных возобновляемых источников энергии⁵» определены важные задачи по реализации адресных мер по использованию альтернативных источников энергии в административно-бытовых зданиях и сооружениях, включая жилые массивы и домохозяйства. В рамках выполнения данных задач особое значение приобретает моделирование расчёта расстояния между теплообменными элементами в процессе теплообмена в термоэлектрических преобразователях, а также создание термоэлектрических зарядных устройств для подзарядки конденсаторов, имеющих на промышленных предприятиях.

Настоящая диссертационная работа в определённой степени способствует реализации задач, предусмотренных Постановлением Президента Республики Узбекистан от 10 июля 2020 года № УП-4779 «О дополнительных мерах по

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 09.09.2022 г. № УФ-220

повышению энергоэффективности экономики и снижению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетических продуктов за счёт привлечения имеющихся ресурсов⁶», Постановлением Президента от 2 декабря 2022 года № ПК-436 «О мерах по повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан к “зелёной” экономике до 2030 года⁷», а также Постановлением Президента от 16 февраля 2023 года № ПК-57 «О мерах по ускорению внедрения возобновляемых источников энергии и энергосберегающих технологий в 2023 году⁸» и другими нормативно-правовыми документами, регулирующими данную сферу деятельности.

Соответствие исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. По диссертационной работе III. В рамках приоритетного направления «Развитие энергетики, энергосбережения, приборостроения, современной электроники, микроэлектроники, электронного приборостроения».

Уровень изученности проблемы. В области термоэлектрической энергетики первоначальные теоретические исследования были проведены физиками Ж.-Б. Ж. Фурье и Х. К. Эрстедом, в последующем же практические научно-исследовательские, проектно-конструкторские и рационализаторские работы выполнялись Фармером, Маркусом, Беккерелем, российским ученым А. Ф. Иоффе и его учениками Л. С. Стилбансом, Е. К. Иорданишвили, Ю. А. Равичем и другими.

На мировом уровне исследования термоэлектрических материалов и устройств проводили Л. П. Булат, И. А. Драбкин, Л. Е. Шалимова, М. К. Житинская, С. А. Немов, Л. Д. Хикс, М. С. Дрессельхаус, Ю. А. Бойков, В. А. Данилов, В. К. Зайцев и А. А. Андреев. Зарубежные учёные, включая Кремера Дэниела, Пуделя Кровата, Фэна Сянь-Пина и других, исследовали высокоэффективные солнечные термогенераторы.

В нашей стране также выполняется ряд теоретических и научно-практических работ в области термоэнергетики, в частности Г. Абдурахмановым, Б. Л. Оксенгендлером, Я. Усмановым, А. С. Есбергеновой, Р. А. Зохиловым, Г. С. Вахидовой, С. А. Маматкуловой, Р. Алимовым, Х. М. Ильиным, К. Гайназаровой и другими. Так, под руководством профессора А. М. Касимахуновой до настоящего времени были созданы различные образцы каскадных, двусторонне чувствительных и селективных фото-термогенераторов, которые находят практическое применение. В научной лаборатории Ферганского государственного университета под руководством М. Б. Набиева изучаются вопросы получения n-типных ветвей тройных термоэлектрических материалов $Bi_2Te_3-Bi_2Se_3$ путем введения различных легирующих добавок.

Связь диссертационного исследования с научными планами высшего или научно-исследовательского учреждения, в котором выполнена

² Постановление Президента Республики Узбекистан от 10.07.2020 № ПП-4779

³ Постановление Президента Республики Узбекистан от 02.12.2022 № ПП-436

⁴ Постановление Президента Республики Узбекистан от 16.02.2023 № ПП-57

диссертация. Диссертация в Ферганском политехническом институте ОТ-Ф-3-19 «Разработка фундаментальных исследований по созданию модульных систем параболоцилиндрических концентраторов нового типа для устройств солнечной энергетики на основе тепловых циклов преобразования энергии», ООО «Электрошок» (Договор № 6-20, научные исследования) № 6 от 16.03.20, выданный Министерством внутренних дел и коммуникаций (МВС). приказ) и ООО «Фергана Автомат Расчет» (Договор № 55-21, Приказ ИТС № 44 х\ш от 02.11.21) заключены на основании хозяйственных договоров.

Цель исследования - Речь идёт о разработке термоэлектрического зарядного устройства для подзарядки конденсаторов, имеющих на промышленных предприятиях, на основе термоэлектрических преобразователей, изготовленных из полупроводниковых материалов p-BiSbTe и n-BiTeSe.

Задачи исследования:

Совершенствование технологии получения термоэлектрических материалов, состоящих из смесей p-BiSbTe и n-BiTeSe;

разработка технологии изготовления термоэлектрических батарей путем подготовки ветвей термоэлементов с помощью электроэрозионного устройства;

имитационное моделирование конструкции ветвей термоэлектрического преобразователя с учетом коэффициентов расширения в зависимости от температуры;

разработка математической модели расчета расстояния между стержнями теплообменника в процессе теплообмена в термоэлектрических преобразователях с несколькими источниками тепла;

создание термоэлектрических зарядных устройств для зарядки существующих конденсаторов на производственных предприятиях;

Объектом исследования были взяты термоэлектрические материалы на основе BiSbTe (p-типа) и BiTeSe (n-типа), кремниевый полупроводниковый материал, конденсаторы и аккумуляторные батареи, полученные с помощью электроэрозионного устройства с высоким КПД.

Предмет исследования состоит в том, что под воздействием тепловой энергии электрофизические явления, возникающие по ветвям термоэлектрических преобразователей, в зависимости от изменения стехиометрического состава материалов BiSbTe (p-тип) и BiTeSe (n-тип) образуют переменные параметры

Методы исследования. В процессе исследования изучаются явления Зибек и Пельте, общая термодинамическая теория дифференциального эффекта Джоуля-Томсона, теории теплоты Томсона и Джоуля, законы энергосбережения, процессы и закономерности преобразования тепла в электрическую энергию, методы повышения эффективности преобразования тепловой энергии в электрическую и вольт-амперные характеристики, методы измерения тепловых потоков и температуры, методы математических расчетов и методы математического моделирования процессов, происходящих в объеме полупроводника.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

С помощью электроэрозионного оборудования была усовершенствована технология высокоточного и эффективного изготовления элементов термоэлектрических генераторов на основе $p\text{-BiSbTe}/n\text{-BiTeSe}$;

Впервые для термоэлектрических материалов на основе Vi_2Te_3 были смоделированы коэффициенты линейного теплового расширения (КЛТР) по кристаллографическим направлениям «а» и «с» в температурном интервале $-55\dots+45\text{ }^\circ\text{C}$ на основе модели Грунайзена, а количественный закон влияния их анизотропии на механическую и тепловую стабильность конструкции термобатареи был установлен;

Впервые выявлена возможность снижения несоответствия между нагрузкой и оптимальным током за счёт изменения геометрических размеров термоэлементных ветвей (длины и площади сечения), то есть математически обоснована точная геометрическая зависимость этого несоответствия;

Впервые создан промышленный источник энергии на основе термоэлектрического источника, работающего при разности температур $\Delta T = 80\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$, который одновременно выполняет функции зарядного устройства для конденсаторов и аккумуляторных батарей мощностью 120 kVar, а также оперативного источника тока для системы защиты;

Разработана математическая модель для определения энергетических характеристик кремниевых термоэлектрических генераторов, работающих в интервале высоких температур.

Практическими результатами исследования являются:

Разработаны конструкции термоэлектрических генераторов, предназначенных для использования на промышленных предприятиях, и представлены физические явления, сопровождающие процессы теплообмена в них;

Создана технология изготовления термоэлементных ветвей из полупроводникового термоэлектрического материала с электронной и дырочной проводимостью, сборки единой термобатареи и предотвращения негативных эффектов в процессе эксплуатации;

Разработаны рекомендации по использованию термоэлектрических генераторов постоянного тока в промышленности в качестве устройств, способных непрерывно осуществлять зарядку для компенсации реактивной мощности, а также приведены принципы их электрического подключения;

Показано, что использование термоэлектрических генераторов в промышленности позволяет частично решать проблемы потерь энергии, является экономически целесообразным и экологически предпочтительным, что подтверждает возможность их широкого применения на практике.

Достоверность результатов исследования Надёжность результатов исследования обосновывается использованием современных методов и измерительных средств, адекватностью теоретических и экспериментальных исследований, положительными результатами испытаний термобатарей, разработанных на основе проведённых исследований, а также их внедрением в практику.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования объясняется тем, что разработанные математические модели для расчёта расстояния между теплообменными элементами в термоэлектрических преобразователях с несколькими источниками тепла и полученные на их основе результаты могут раскрывать физические процессы несоответствия между рабочими и оптимальными токами вдоль термоэлементных ветвей.

Практическая значимость результатов исследования заключается в создании источника подзарядки конденсаторных батарей для компенсации недостатка реактивной мощности в области релейной защиты и автоматизации на базе разработанного термогенератора.

Внедрение результатов исследований.

По результатам разработки термоэлектрических генераторов и проверки их параметров для промышленности:

Термогенераторы, предназначенные для использования на промышленных предприятиях, были внедрены в энергетические системы в качестве источника постоянного оперативного тока для обеспечения цепей оперативного тока устройств релейной защиты постоянной электроэнергией на АО «Ферганская ТЭЦ» (справка АО «Ферганская ТЭЦ» № 08-5/2007 от 30 августа 2024 года о внедрении результатов научно-исследовательских работ на теплоэлектростанциях). В результате предприятие достигло экономической эффективности в размере 8 324 000 сум за счёт обеспечения цепей оперативного тока устройств релейной защиты термобатареями как источником постоянного тока.

Технология высокоточного и эффективного изготовления элементов термоэлектрических генераторов на основе $p\text{-BiSbTe}/n\text{-BiTeSe}$ с применением электроэрозионного оборудования была внедрена на АО «ФОТОН» (справка УЗЕЛТЕХСАНОТА № 190 от 5 ноября 2024 года). В результате рекомендовано производство источников, способных одновременно заряжать конденсаторные батареи мощностью 120 kVar и аккумуляторные батареи, а также выполнять функцию источника оперативного тока для релейной защиты, предназначенных для промышленных предприятий.

Апробация результатов исследования Результаты диссертации были представлены и обсуждены на 6 международных конференциях и 2 республиканских научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, в том числе 1 Патент на Полезную Модель, 4 статьи в международных научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций (из них 1 статья - в издании, индексируемом в базе данных Scopus), а также 4 статей в республиканских изданиях. Получено 1 международное свидетельство об авторском праве на научную разработку и 5 свидетельств на программные продукты для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Содержание диссертации включает введение, пять глав, общие выводы, список использованной литературы и приложения. Объем диссертации составляет 116 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В введении обоснованы актуальность и необходимость проведенных исследований, цели и задачи исследований, определены объект и предмет, указано на соответствие приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Изложена научная новизна и практические результаты исследования, раскрыта теоретическая и практическая сущность полученных результатов, достоверности и внедрения в практику результатов исследований, результатов апробации научной работы, опубликованных работ и структуры диссертации. В первой главе диссертации **«Этапы развития термоэлектрической энергетики и современное состояние исследований в этой области»**, поясняется, что физические процессы, составляющие основу термоэлектрической энергетики, и предотвращение потерь энергии за счет использования вторичных источников тепловой энергии на их основе является одной из основных задач современности, использование которых в качестве источника электрической энергии является положительным решением в условиях дефицита энергии. Показаны работы, сделанные учеными мира и нашей страны с использованием эффекта Зеебека, первооткрывателем явления «термоэлектрический эффект», их изобретения и инновации. На основе анализа существующих экспериментальных и теоретических данных определены проблемы и задачи исследования.

Во второй главе диссертации **«Проблемы использования термоэлектрических аккумуляторов в промышленности, их решения и теоретические исследования»** в целях создания термоэлектрических аккумуляторов, предназначенных для производственных предприятий, начальные этапы исследовательских работ осуществляются на десятках производственных предприятий, действующих в нашей стране, и более тщательное получение электрической энергии от отпускаемой тепловой энергии, а также определение энергетических и эксплуатационных параметров автономных источников энергии, удовлетворяющих потребности граждан, проживающих в сельской, горной, пустынной и пустынной территориях, вызывающих недовольство населения из-за нехватки энергии, усовершенствование технологии или поиск новых методов.

В нем были изучены ранее известные технологии аккумуляторов и проведена работа по определению среди них менее сложных и экономически более дешевых технологий. Термопары являются основными элементами термоэлектрических генераторов, обеспечивающими правильное преобразование тепловой энергии (вторичных тепловых выбросов промышленности, двигателей внутреннего сгорания тепловых двигателей, газовых турбин и т. д.) в электрическую энергию. С этой целью были изучены результаты нескольких технологических изобретений.

Разработана методика расчета и оценки параметров термогенераторов, планируемых к использованию на практике, при этом учтен ряд сложностей. Величина выходной мощности термобатареи или термоэлектрических генераторов (ТЭГ) ограничивает возможность получения точной информации о материале, из которого изготовлен ТЭГ, и его электрофизических параметрах его геометрическими размерами, а кроме того, о соотношении электрических и тепловых параметров. Несмотря на современное развитие термоэлектрической энергетики, в существующей научной литературе работ по описанию тепловых процессов, происходящих во всем объеме ТЭГ, очень мало, и их не хватает для каждой системы охлаждения. Поэтому в результате теоретических расчетов была разработана и подготовлена конструкция термоэлектрического генераторного устройства. Схема подключения установки к вспомогательным рабочим органам и к электрической схеме представлена на рис. 1.

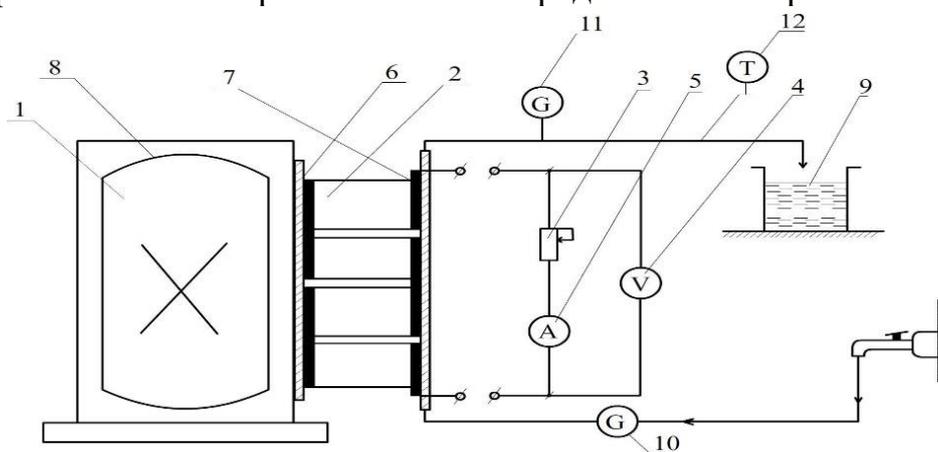


Рис.1. Схема подключения термоэлектродвигательного устройства к вспомогательным эксплуатационным конструкциям и электрической цепи.

Основными элементами прибора являются: 1 - источник тепла (Примечание: в качестве источника тепла принят резервуар химической промышленности, рабочая температура которого за счёт протекающих реакций достигает $T_{ish} = 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 2-ТЭГ, 3-нагрузочный, 4-вольтметр измерительный, 5-амперметр, 6,7,8-температурные термопары, 9-резервуар холодной воды, 10,11-измеритель расхода воды. устройство, 12-б/у водопроводная труба. Принцип работы устройства следующий: процесс производства селитры, являющейся основным продуктом азотного завода, состоит из нескольких стадий химических процессов, максимальная наблюдаемая температура составляет $110 \div 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$. В качестве источника тепла была принята гладкая и плоская поверхность химического технологического резервуара. К нему приклеили горячие концы термобатареи с помощью пасты марки КТП-8. Поскольку ТЭГ находился на высоте 25 см над землей, труба охлаждения была прочно закреплена на земле, чтобы предотвратить ее обрушение под собственным весом, учитывая свисающие холодные концы.

Для расчетов использовались следующие данные. Условно принималось следующее: поверхность элементов, составляющих ТЭГ, прямоугольная, поверхность теплопередачи - плоская, а поверхность теплоприемника ТЭГ

(пластин переключения горячего конца - материал железа) является хорошим проводником тепла и электрический приклеивается пастой КТП-6 через изолирующую керамическую пластину.

В качестве материала ТЭГ планируется использовать BiSbTe (р-тип) и BiTeSe (n-тип), а информация о термопарах приведена в таблице ниже.

Таблица 1.

Параметры модуля термопары

Материал	Размеры		Электрофизические свойства		
	Длина мм	Сорок мм ²	а (м ² /градус)	г (ом*см)	æ (Вт/см·град)
BiSbTe (р-тип)	14	4x4	218	1031	15.3
BiTeSe (n-тип)	14	4x4	234	0,205	14.1

В ходе расчетов также определялись тепловые параметры. При решении этой задачи в качестве основных формул использовались выражения теплового баланса и теплоотдачи:

$$Q = C_{сг} \cdot \Delta T_{и} = C_{сс} \cdot \Delta T_{с} \quad (1)$$

$$Q = k \cdot \Delta T \cdot F_{ию} \quad (2)$$

$$\Delta T = \left(\frac{T'_{и} - T''_{и}}{2} - \frac{T'_{с} - T''_{с}}{2} \right) \quad (3)$$

Здесь Q - количество тепла, подведенное к горячим концам ТЭГ от источника тепла; $\Delta T_{и}$ - разница горячих температур теплоносителя на входе и выходе ТЭГ (к) $\Delta T_{с}$ - разница воды, несущей тепло для охлаждения на входе и выходе холодных концов ТЭГ (к) ; $\overline{\Delta T}$ температурное давление между горячим и холодным теплоносителем, (к) ; $F_{ию}$ - поверхность теплообмена, (м²) ; $T'_{и}, T''_{и}, T'_{с}, T''_{с}$ - горячая и холодная температуры на входе и выходе теплоносителей, к .

Используя уравнение теплового баланса (1).

$$\begin{cases} T''_{и} = T'_{и} - \frac{Q}{C_{сг}}, \\ T''_{с} = T'_{с} - \frac{Q}{C_{сс}}, \end{cases} \quad (4)$$

мы определяем.

Подставив найденные значения в уравнение (3), можно определить давление средних температур.

$$\overline{\Delta T} = (T'_{и} - T'_{с}) - \left(\frac{1}{2C_{сг}} + \frac{1}{2C_{сс}} \right) Q \quad (5)$$

Подставив последнее полученное выражение в уравнение теплопередачи, можно решить задачу теплопередачи.

$$Q = \frac{T'_{и} - T'_{с}}{\frac{1}{\alpha_i \cdot F_{ию}} + \frac{1}{2C_{сг}} + \frac{1}{2C_{сс}}} \quad (6)$$

(6) – параметр, входящий в формулу

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{h_{дев}}{\alpha_{дев}} + \frac{h_M}{\alpha_M} + \frac{h_{дев}}{\alpha_{дев}} + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (7)$$

ч- коэффициент теплопередачи.

PS_i – термический коэффициент теплоносителя на горячей стороне. Этот параметр состоит из суммы теплопередачи конвективным способом PS_k и теплопередачи излучением PS_n .

$$\Psi_{и} = \Psi_{к} + \Psi_{м} \quad (8)$$

$$\Psi_{к} = \frac{NU_{и} \cdot \alpha_{и}}{d_1} \quad (9)$$

где $NU_{и}$ - критерий Нуссельта для переноса тепла на горячих концах, и эта величина зависит от числа Рейнольдса. Число Рейнольдса зависит от поведения теплоносителя в трубке:

$$Re_u = \frac{w_u \cdot d_1}{\gamma_u} \text{ - Число Рейнольдса.} \quad (10)$$

(10) в выражении $w_u = \frac{G_u}{\rho_u \cdot F_{кирк}}$ - скорость движения теплоносителя внутри стержня по горячей стороне, м/с;

Теплопроводность излучением

$$\Psi_{н} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot 10^{-8} \left(\frac{T_u^4 - T_{дев1}^4}{T_u - T_{дев1}^4} \right) \quad (11)$$

равно ε в этом выражении - заданный уровень черноты системы теплообмена, $Вт/(м^2 \cdot K^4)$, $C_0 - 5,67 \text{ Вт}/(м^2 \cdot K^4)$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела; $T_{отр1}$ – температура стенки теплоносителя на горячей стороне, К.

Коэффициент теплопередачи на стороне, где холодные концы ТЭГ охлаждаются водой

$$\Psi_{с} = \frac{NU_{с} \cdot \alpha_{с}}{d_{кел}} \quad (12)$$

Здесь $d_{кел} = \sqrt{\frac{4F_{сов}}{3,14}}$ тарелкообразный диаметр сечения системы охлаждения, м; $F_{сов}$ - поверхность поперечного сечения хладагента, $м^2$; Nu_c – критерий Нуссельта для теплоносителя, подключаемого к холодным концам.

Для определения критерия Нуссельта необходимо определить режим движения рабочего агента (воды) в холодильнике:

$$Re = \frac{w \cdot d_{кел}}{\gamma_c} \quad (13)$$

Здесь $w = \frac{G_c}{\rho_c \cdot F_{сов}}$ – скорость движения рабочего тела в пространстве внутри стержня, м/с.

Количество теплоты, найденное по формуле (6), можно использовать для определения конечной температуры теплоносителя, подставив значение Q в уравнение (4).

Температура стенок со стороны истечения рабочего агента из воронки, D_j ,

$$Q_1 = PS \cdot F_{дев1} \cdot (T_u - T_{дев1}) \quad (14)$$

Согласно закону сохранения энергии количества теплоты, представленные в формулах (6) и (13), равны между собой. (13) температуру стенки находим по формуле К:

$$T_{дев1} = T_u - \frac{Q_1}{\Psi_u \cdot F_{дев1}} \quad (15)$$

в последнем выражении $F_{\text{дев1}}$ – площадь внутренней поверхности сосуда, м^2

Температура на стенке наружного диаметра поверхности теплоотдающей трубки, теплообмен

$$T_{\text{дев2}} = T_{\text{дев1}} - \frac{Q_1}{2 \cdot F_{\text{дев1}} \cdot \alpha_{\text{дев}}} \cdot \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \quad (16)$$

Определяется по формуле, K в последней формуле $d_2 = d_1 + 2 h_{\text{дев}}$ – наружный диаметр вала на горячем конце, м .

Температура горячих концов термопары

$$T_{\text{дев3}} = T_{\text{дев2}} - \frac{Q_2}{2 \cdot F_{\text{дев2}} \cdot \alpha_{\text{кер}}} \cdot \ln \left(\frac{d_3}{d_2} \right) \quad (17)$$

Здесь $d_3 - d_2 + 2 \alpha_{\text{кер}}$ – диаметр вала с учетом толщины керамического слоя, м .

Одним из параметров, необходимых для выполнения электрических расчетов, является $T_{\text{дев3}}$, который указывает температуру на горячих концах термоэлектрического модуля.

Теперь необходимо определить количество тепла, поступающего к этим горячим концам. Он рекомендуется найти через

$$Q_2 = \frac{\alpha_{\text{дев}}}{h_{\text{дев}}} \cdot F_{\text{дев2}} \cdot (T_{\text{дев2}} - T_{\text{дев3}}) \quad (18)$$

Именно в этом процессе также необходима информация о значении температуры холодных концов. Для этого первоначально рассчитывается разница температур между горячим и холодным концами по следующему выражению

$$\Delta T_{\text{Э}}^2 \cdot \frac{Z_{\text{ТЭ}}}{2 \cdot (1 + m^2)} - \Delta T_{\text{ТЭ}} \left(1 + \frac{Z \cdot T_{\text{ТЭ}}}{1 + m} \right) + \frac{Q_3 \cdot l}{(S_p \cdot \alpha_p + S_n \cdot \alpha_n)} = 0 \quad (19)$$

Мы можем написать. Известно, что здесь $Z_{\text{ТЭ}}$ – КПД термопары, $1/\text{К}$; $m = \frac{R_n}{R_m}$ – относительная полезная нагрузка [5].

Если при технологическом производстве необходимо при монтаже соединить термоэлектрический модуль с источником тепла через дополнительные вспомогательные слои, то температура каждого дополнительного слоя

$$T_{\text{деви}} = T_{\text{деви-1}} - \frac{Q}{2 \cdot F_{\text{деви-1}} \cdot \alpha_{\text{деви-1}}} \cdot \ln \left(\frac{d_i}{d_{i-1}} \right) \quad (20)$$

Определить можно по формуле. При моделировании также предусмотрен вопрос адаптации ТЭГ, собранного с ТЭ, к условиям эксплуатации.

Именно для этого и нужно количество тепла, проходящего через каждый слой. Можно идентифицировать через.

$$Q_i = \frac{\alpha_i}{h_i} \cdot F_{\text{деви}} (T_{\text{деви-1}} - T_{\text{деви}}) \quad (21)$$

Расчет электрических параметров термоэлектрических генераторов проводился путем объединения нескольких методов. Целью этого является не только определение основных электрических параметров, но и определение отличия тока нагрузки $I_{\text{ю}}$ от оптимального значения I , выбираемого по длине ветвей термопары. Потому что в зависимости от того, насколько $I_{\text{ю}}$ соответствует $I_{\text{опт}}$, можно оценить, сколько можно потерять из коэффициента полезной работы.

Таким образом, коэффициент Зебека термоэлектрического модуля В/К ,

$$E = 2 \cdot N \cdot a \quad (22)$$

Здесь N – количество термопар, включенных в схему; a – термоэлектрическая проводимость термопар, В/К.

Разница температур между горячим и холодным концами, К:

$$\Delta T_{ТЭ} = T_{\text{дев3}} - T_{\text{дев2}} \quad (23)$$

Напряжение термоЭДС, В:

$$E_{ТЭГ} = E \cdot \Delta T_{ТЭ} \quad (24)$$

Сила тока в паре модулей

$$I = \frac{E \cdot \Delta T_{ТЭ}}{R_m \cdot (1+m)} \quad (25)$$

Напряжения, падающие на внешнюю нагрузку, В:

$$U = E \cdot \Delta T_{ТЭ} \cdot \frac{m}{1+m} \quad (26)$$

и, соответственно, выходная мощность на нагрузку во внешней цепи:

$$p = \frac{E^2 \cdot \Delta T_{ТЭ}^2}{R_m} \cdot \frac{m}{(1+m)^2} \quad (27)$$

Количество полезной работы, производимой отдельно на внешнюю нагрузку, исходя из закона термодинамики, составляет Вт [3].

$$W = Q_3 - Q_i \quad (28)$$

Термический КПД цикла при преобразовании прямой тепловой энергии в электрическую

$$\eta = \frac{W}{Q_3} \quad (29)$$

Точно фики термоэлектрического генератора

$$\eta_i = \frac{\Delta T_{ТЭ}}{T_{\text{дев3}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{m} + \frac{1}{Z_{ТЭ} \cdot T_{\text{дев3}}} \cdot \frac{(m+1)^2}{m} \cdot \frac{\Delta T}{Z_{ТЭ} \cdot T_{\text{дев3}} \cdot m}} \quad (30)$$

В третьей главе диссертации под названием «**Исследование электрофизических параметров и эксплуатационных конструкций термогенераторов методом моделирования на основе $(\text{Bi}_2\text{Sb})\text{Te}_3$ и $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)\text{Se}$** » выполнено для различных режимов реализации тепловых и электрических параметров термоэлектрических генераторов путем моделирования. Предполагалось, что двигатель 1НВД2У будет использоваться в качестве источника для 8 ламп с внутренним сопротивлением 350 Ом каждая. Длина ветвей ТЭГ составляет 0,14 м, последовательно соединены 8 пар ТЭГ. Его электрические параметры $\Delta T = 100^\circ \text{C}$ давал $U = 7,50\text{--}12,5$ В, ток $I = 0,005\text{--}0,02$ А и мощность $w = 0,23\text{--}0,5$ Вт.

На основе расчетов получены расход теплоносителя (расход воды на холодных концах) и его изменение в зависимости от нагрузки двигателя, обеспечивающего расход воды (табл. 2).

Таблица 2.

% ЧТО	$G_{\text{COB}} \text{ M}^3/\text{c}$	$G_{\text{COB}} \text{ M}^3/\text{час}$
80	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,032
60	$3,2 \cdot 10^{-5}$	0,117
40	$8,4 \cdot 10^{-5}$	0,314
20	$2,2 \cdot 10^{-5}$	0,818
10	$0,5^5$	1534
Тяжелая работа	-	-

Температурный коэффициент, который представляет собой линейное расширение материала, был определен двумя разными способами для материалов на основе теллурида висмута. В первом методе $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Se}$ (n-тип) образование соединения и второй такой твердой квазибинарной смеси $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_{x\text{lar}}$ проводилось исходя из вероятности того, что оно мало отличается от своего идеального состояния. В формуле (30) коэффициент линейного расширения состоит из δ_L его составляющих δ_a и δ_c определяется из следующих соотношений:

$$\delta_a = \delta_L + (3c)^{-1}a \left[\frac{d\left(\frac{a}{c}\right)}{dT} \right] = \delta_L + \frac{\delta_a - \delta_c}{3} \quad (31)$$

и

$$\delta_c = \delta_L + \left(\frac{2a}{3c}\right) \left[\frac{d\left(\frac{a}{c}\right)}{dT} \right] = \delta_L - \frac{2(\delta_a - \delta_c)}{3} \quad (32)$$

Используя приведенные выше выражения $\delta_L = f(T)$, $\delta_a = f(T)$ и $\delta_c = f(T)$ установлены зависимости и получена информация о термоэлектрических материалах на основе Bi_2Te_3 с эффективной n-проводимостью, работающих при низких рабочих температурах. На рис.2 представлена схема программного алгоритма исследования температурного коэффициента линейного расширения термоэлектрических материалов на основе Bi_2Te_3 и результаты на рисунках 3÷6.

Установлено, что по характеристикам химических связей этих материалов внутри слоистых структур температурный коэффициент линейного расширения имеет четкое анизотропное описание вдоль кристаллографических осей «а» и «с». Его можно представить как сложную совокупность слоев, то есть в виде квинтетов атомов, перпендикулярных кристаллографической оси «с».

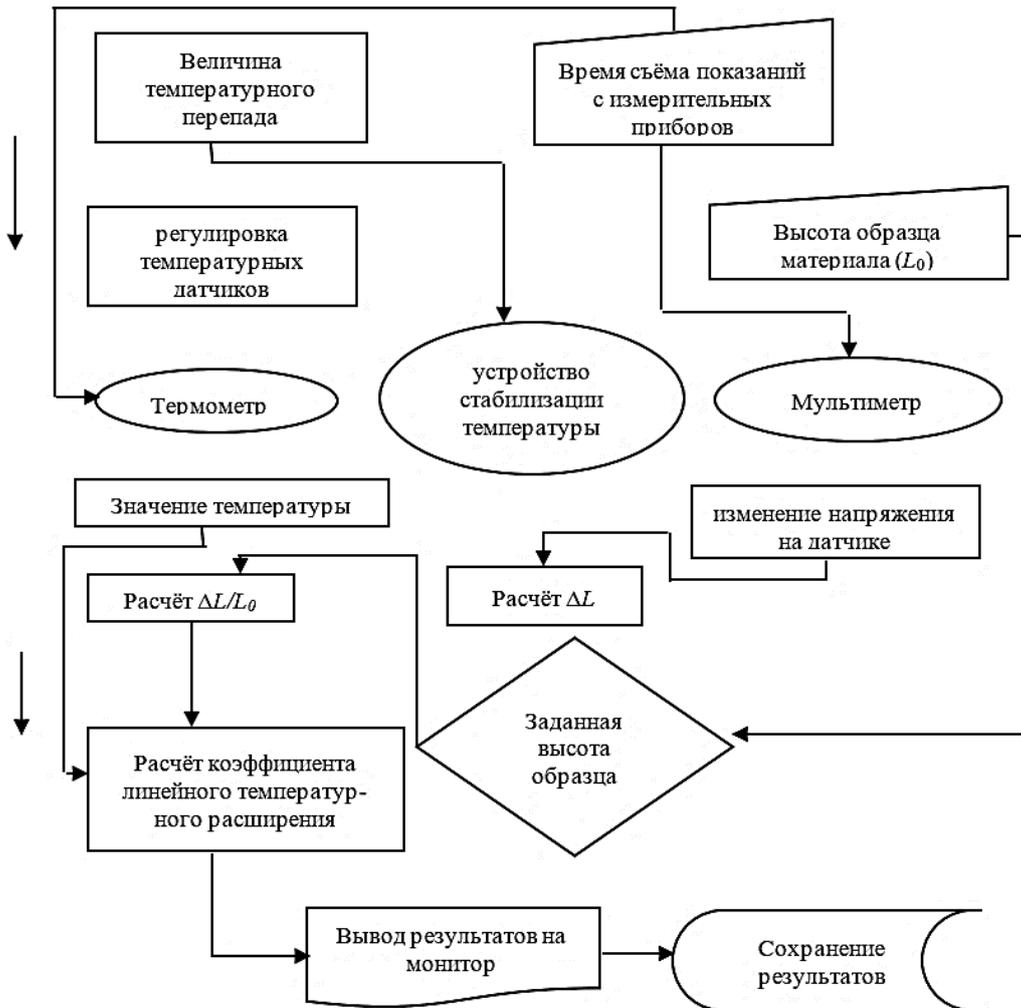


Рис.2. Алгоритм программы расчета температурного коэффициента линейного расширения

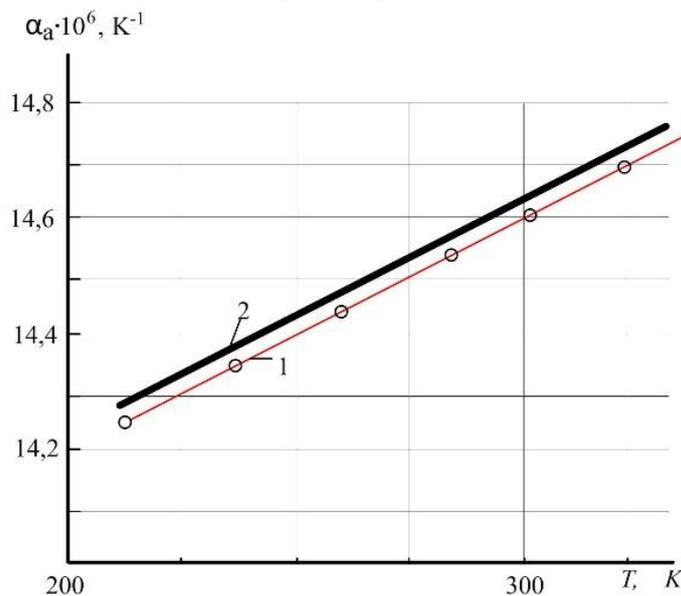


Рис.3. $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.88}\text{Se}_{0.12}$ Температурная зависимость коэффициента теплового расширения вдоль оси «а». 1 - результаты автора диссертации, 2 - научные результаты Ю.И. Штерна.

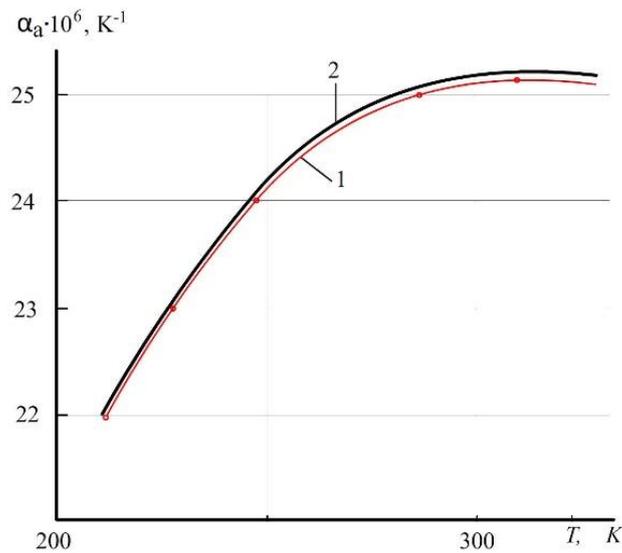


Рис.4. $Bi_2Te_{2.88}Se_{0.12}$ Температурная зависимость коэффициента теплового расширения по оси «с». 1 - результаты автора диссертации, 2 - научные результаты Ю.И. Штерна.

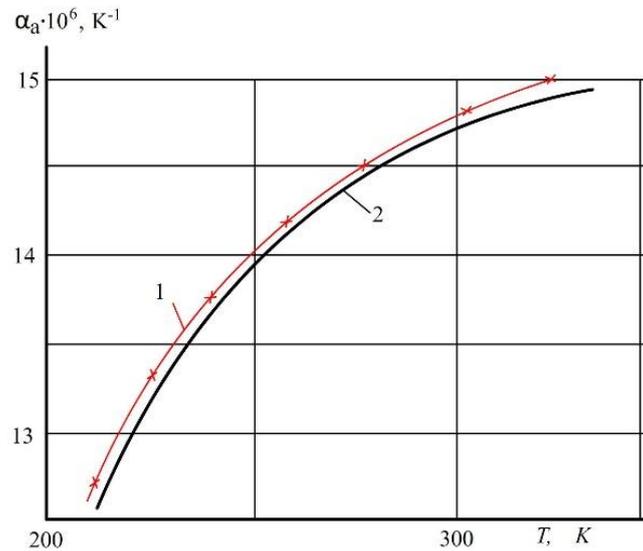


Рис.5. $Bi_{0.52}Sb_{1.48}Te_3$ Температурная зависимость коэффициента теплового расширения вдоль оси «а». 1 - результаты автора диссертации, 2 - научные результаты Ю.И. Штерна.

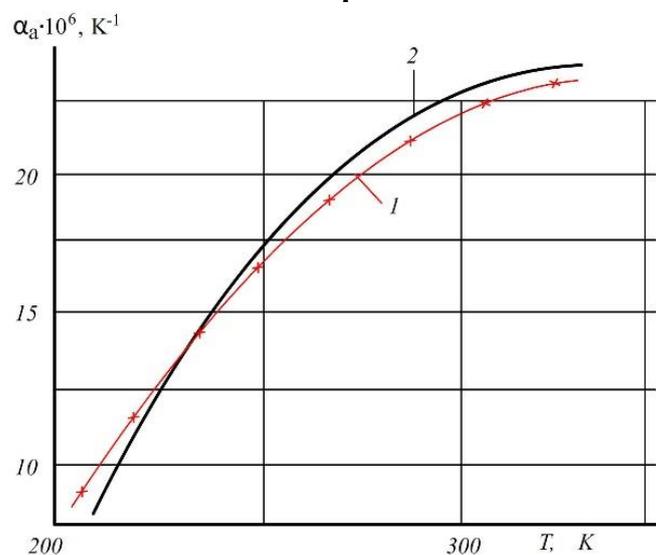


Рис.6. $Bi_{0.52}Sb_{1.48}Te_3$ Температурная зависимость коэффициента теплового расширения по оси «с». 1 - результаты автора диссертации, 2 - научные результаты Ю.И. Штерна.

Разработка конструкции термогенератора, определение параметров материалов элементов генератора осуществлялись путем моделирования в программе COMSOL Multiphysical. Моделирование на рис. 7 процесс показано.

Полученные результаты представлены на рисунке 7,8. Как видно из графиков, значения тока уменьшаются после увеличения высоты элементов термогенератора от 6 мм. Напряжение и мощность получают свои средние значения. С учетом этих условий были определены оптимальные размеры путем изменения поверхности элементов термогенератора с 9 мм² до 36 мм², оставив высоту элементов термогенератора постоянной 6 мм.

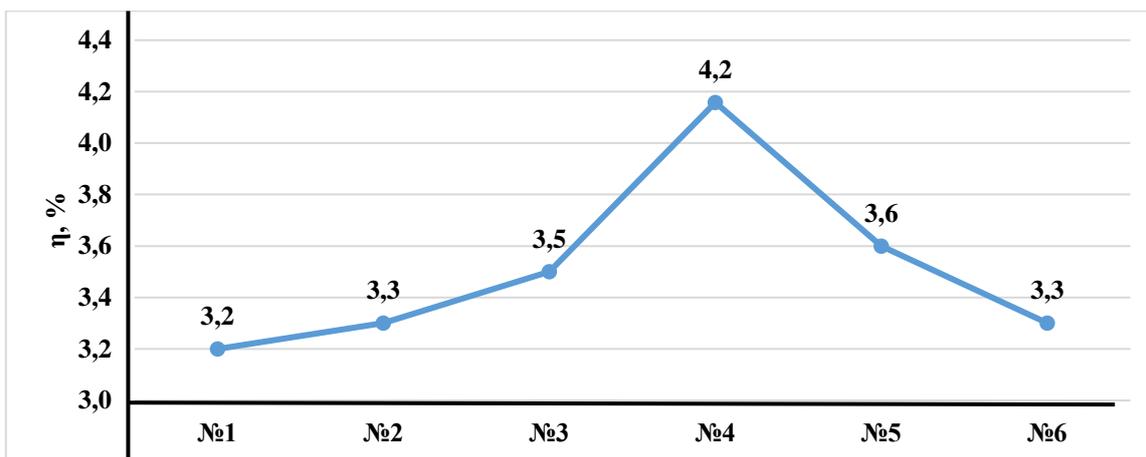


Рис.7. Зависимость КПД термоэлектрического генератора от высоты ветвей

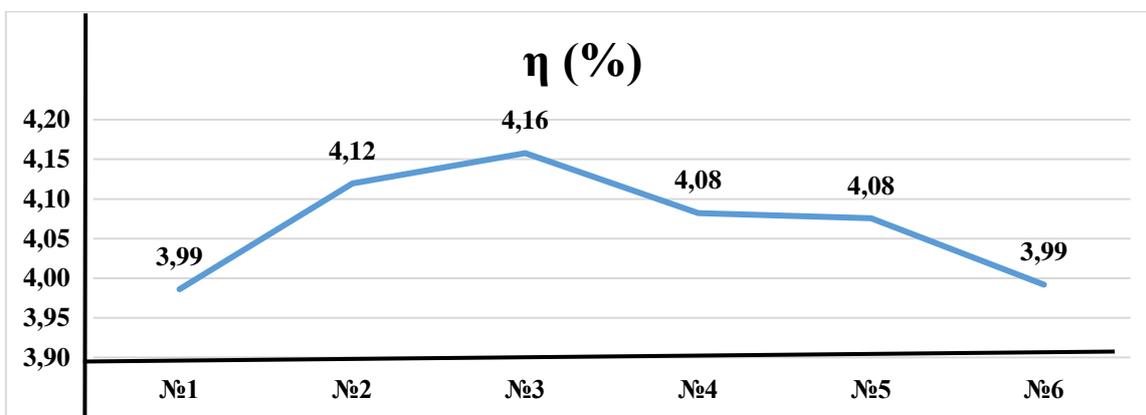


Рис.8. Зависимость КПД термоэлектрического генератора от площади поперечного сечения его элементов

Полученные в результате моделирования результаты были сопоставлены с результатами экспериментальных испытаний термоэлектрического модуля ТГМ-127-1,4-2,5 ОАО «КРИОТЕРМ» (таблица 1).

Имя	Геометрические размеры, мм			U, V	I, A	R, Vt	η, %
	A	B	H				
ТГМ-127-1,4-2,5	40	40	4.8	2.5	0.65	1.63	3.2
Результат модели	40	40	6	3.42	1.48	5.067	4.1

Как видно из табличных значений, результаты, полученные в процессе моделирования, более эффективны, чем ТГМ-127-1,4-2,5. В частности, мы видим, что эффективность улучшилась на 0,9%. Данную ситуацию можно объяснить тем, в какой степени к.п.д. термоэлектрического генератора зависит от его геометрических размеров при его моделировании. Итак, вы видите, что элементы термоэлектрического генератора зависят не только от его высоты, но и от площади его поперечного сечения. С этой точки зрения, в ходе моделирования площадь поперечного сечения также рассматривалась как переменная при различных значениях, а результаты были получены и сравнены.

■ ТГМ-127-1,4-2,5 ■ Результат модели

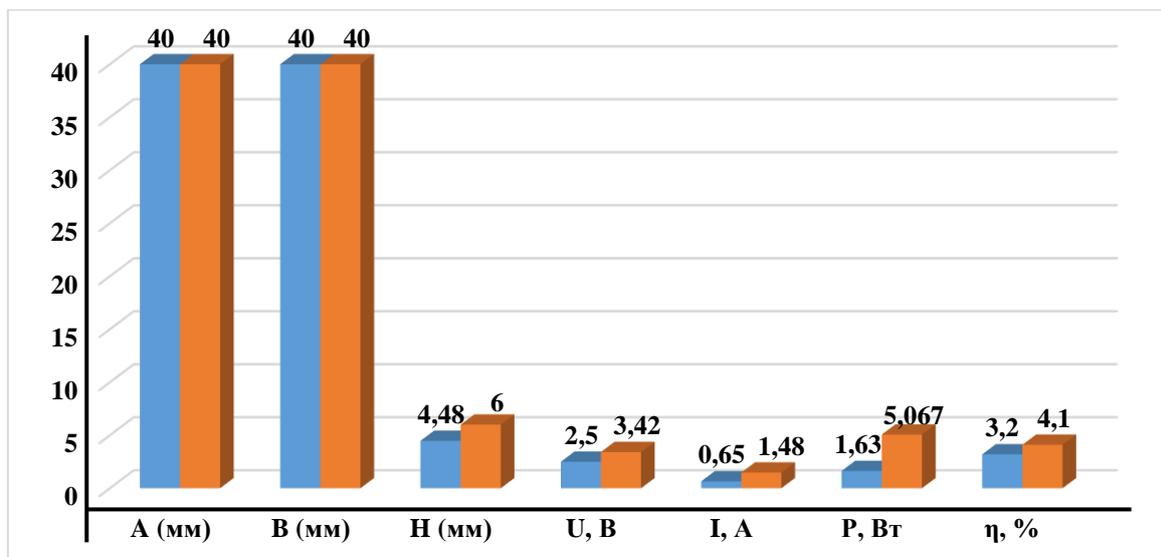


Рис.9. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными термоэлектрического модуля ТГМ-127-1,4-2,5 (ОАО «КРИОТЕРМ»).

В четвертой главе диссертации под названием «Опыты, результаты и рекомендации по использованию термоэлектрических генераторов в производстве термоэлектрических генераторов» проведены экспериментальные испытания термоэлектрических генераторов изготовленных на основе теоретических и практических исследований на промышленных предприятиях и анализ полученных результатов. Заготовку ветвей термопары производят в электроэрозионном устройстве (рис. 10), кинематическая схема которого представлена на рис.11.



Рис.10. Электроэрозионное устройства.

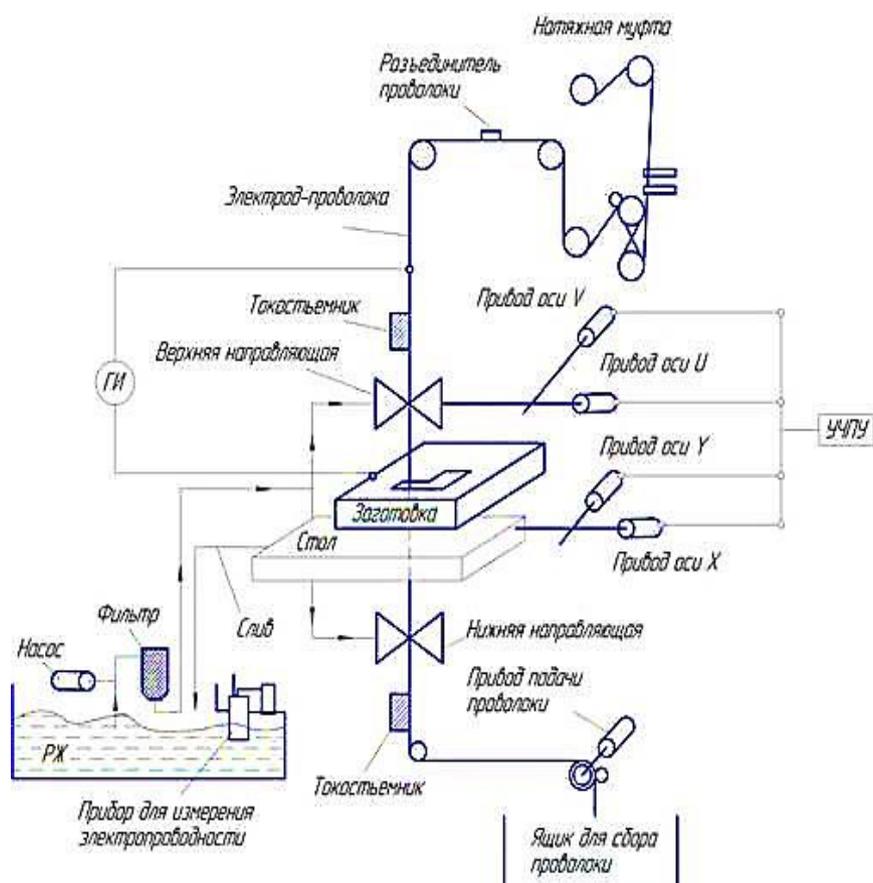


Рис.11. Кинематическая схема устройства.

В данной главе диссертации указано, что в Ферганской области и в целом на территории Узбекистана имеется большое количество производственных предприятий, связанных с химической промышленностью, предназначенных для осуществления различных технологических процессов, таких как тепловая обработка не только основных, но и вспомогательных технологических средств, выделение тепла из-за химических процессов (пункт 1 в редакции Однако было отмечено, что использование углеводородного топлива, а затем выбрасывание большого количества тепла, стало одной из актуальных проблем сегодняшнего дня с точки зрения энергосбережения, и было рассмотрено использование ТЭГ. Кроме того, были изучены и оценены возможности изготовления ТЭГ из «обычного в природе кремния»

Есть еще одна область производства, в которой еще предстоит рассмотреть возможность использования ТЭГ. Невозможно обеспечить бесперебойность электроснабжения без соблюдения требований этого сектора. Этой областью является область релейной защиты и автоматики (РЗ и А). Поле РН и А предотвращает аварии, которые могут происходить постоянно в системе электроснабжения, предотвращая повреждения и самое главное – угрозу жизни людей. Часть этой системы защиты питается через рабочие цепи, которые создают источник постоянного тока. В качестве объекта исследования были взяты конденсаторные батареи, служащие для питания системы электроснабжения источником постоянного тока. Для этой цели также были взяты аккумуляторные батареи. Они непрерывно заряжаются при подключении к сети переменного тока и обеспечивают необходимое питание элементов

релейной защиты в случае возникновения аварийной ситуации в сети. На рисунке 12 ниже показан принцип работы максимальной токовой защиты (МТЗ) путем подключения батареи конденсаторов к сети традиционным способом и отбора от нее электроэнергии. При возникновении короткого замыкания (QT) в линии, защищаемой МТН, в данной схеме срабатывание автоматического выключателя, защищающего ее от перегрева и плавления, осуществляется за счет энергии, запасенной в конденсаторной батарее *S*. Схема состоит из двух реле тока и реле времени и выполнена на основе обычных соединений. Конденсатор *C* заряжен. Заряжается с помощью зарядного устройства *ЗУ-400*. Зарядное устройство, в свою очередь, питается через измерительный трансформатор напряжения или трансформатор специального назначения. При возникновении QT пусковое реле замыкается и замыкает цепь реле времени. По истечении времени ожидания реле времени конденсатор *C* подается на катушку отключения (КО) и отключается от сети за счет зарядного тока.

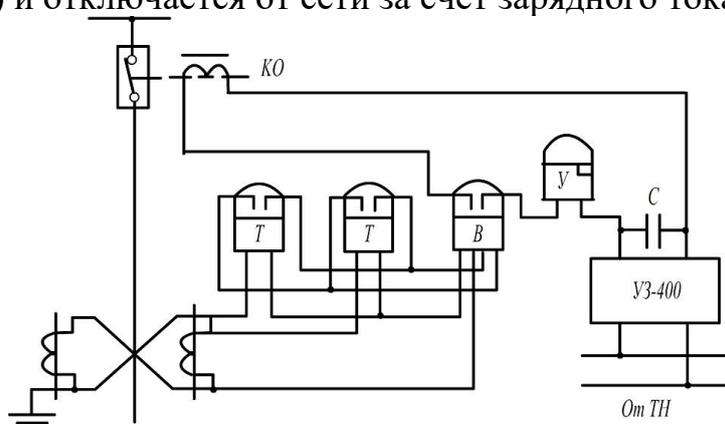


Рис.12. Схема защиты по максимальному току, питаемая от заряженного конденсатора.

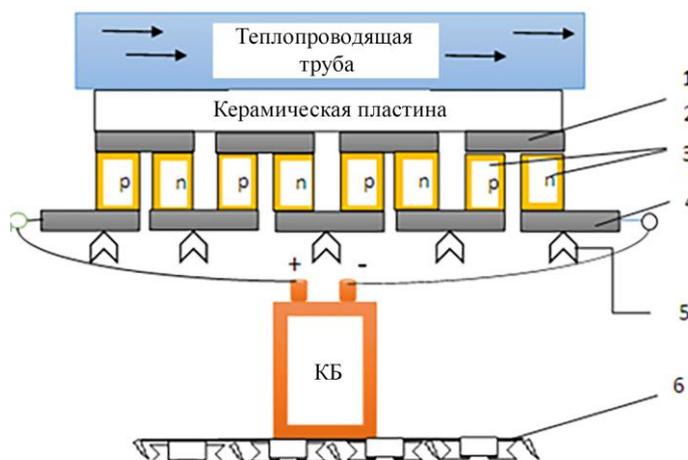


Рис.13. Схема подключения ТБ к батарее конденсаторов.

На рис.13 1, 4 соответственно, переключающие пластины (Fe и Ni) на горячем и холодном концах ТЭ, полуветви термопар 3-го и n-типа ($\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{BiSb}_3$ $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$), напольные прицепы для подъема 5-ТБ, 6-КБ стоя с уровня земли

В эксперименте в качестве зарядного устройства для конденсаторной батареи использовался ТЭГ. Схема его электрического подключения представлена на рисунке 13.

В ходе эксперимента с помощью электроизмерительных приборов контролировались величина тока, протекающего через объем термоэлектрической батареи, и величина напряжения на ее выходах, а диаграмма строилась и записывалась автоматически с помощью самопишущего устройства. Поскольку расход воды был постоянным, а продолжительность технологического процесса – непрерывной, разница температур воды не менялась более чем на $\approx \pm 1,0 \div 1,4\%$ за трое суток эксперимента. Продолжительность времени полной зарядки составила 45 минут, а время восполнения остаточного заряда после однократного срабатывания релейной защиты – 3 минуты. Это удовлетворяет требованиям надежности.

На рисунке 14 представлен график, показывающий эффективность испытанного ТЭГ в зависимости от температуры его горячего конца, которая традиционно представляет собой экспоненциально возрастающую величину FIC и согласуется с графиками, представленными в другой литературе.

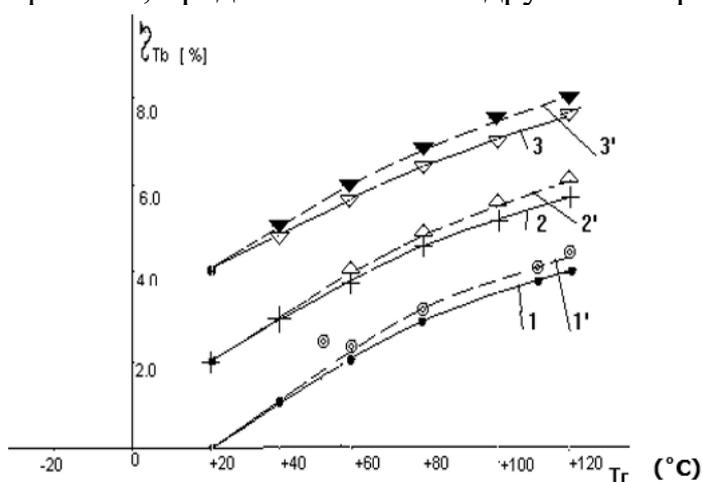


Рис.14. График, показывающий эффективность термоэлектрической батареи в зависимости от изменения температуры на ее холодных концах. 1,1' - $T_x = +20$ °C; 2,2' - $T_x = -20$ °C; 3,3' - $T_x = -60$ °C;

В рис.14 Пунктирные линии показывают ценность теоретических расчетов путем моделирования, а сплошные линии показывают экспериментальные результаты.

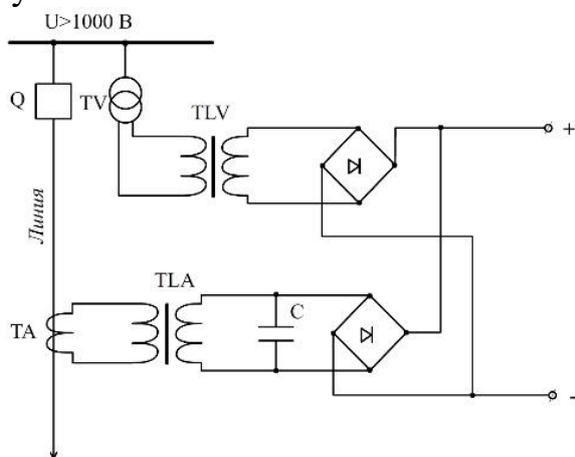


Рис.15. Зарядка КБ с помощью измерительных трансформаторов и выпрямительного блока.

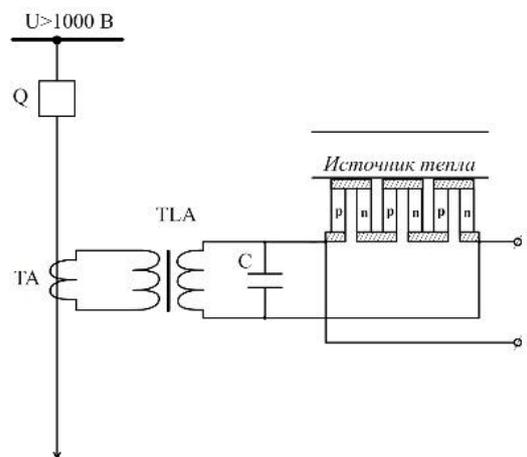


Рис.16. Зарядка КБ через термоэлектрическую батарею

Следующий эксперимент был проведен по зарядке аккумуляторных батарей (КБ). На рис.15 представлена схема зарядки КБ с использованием измерительных трансформаторов и выпрямительного блока, а на рис.17 показана их замена на ТЭГ.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных научных исследований, проектно-конструкторской и опытно-испытательной работы по диссертационной работе сделаны следующие выводы:

1. Термоэлектрическая энергетика, являясь одним из альтернативных источников энергии и несмотря на её широкое применение в различных областях науки и техники, в настоящее время практически не используется для нужд промышленных предприятий. Вместе с тем разработаны термоэлектрические батареи малой и средней мощности, оптимальные для удовлетворения эксплуатационных потребностей энергосистем.

2. Установлено, что при производстве термоэлектрических батарей для нужд энергосистемы целесообразно использовать материалы из низкотемпературных термоэлектрических материалов, легированных TeI_4 на основе смеси $BiTe-BiSb$, с термоэлектрической эффективностью, равной $Z=3 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$.

3. Методом моделирования были рассчитаны состав, эффективность, геометрические размеры, рабочие и эксплуатационные параметры термоэлектрических материалов с высокой точностью и создана возможность получения точной информации по всем изыскиваемым свойствам.

4. Разработанная программа на основе систем $BiSb-BiTe$ обеспечивает возможность определения эффективности материалов термоэлектрических генераторов, а также оценки их мощности и электрофизических параметров.

5. Установлено, что время зарядки с помощью аккумулятора, состоящего из 120 термоэлементов, 40 квар-мощностью, составляет $\Delta T=100^{\circ}C$, когда 1 ч 47 мин.

6. Впервые для энергосистемы были спроектированы, определены, разработаны и испытаны ТЭГ, работающие как источник оперативного тока для работы по защите и автоматике реле с использованием энергии сбрасываемых технических вод.

7. Впервые было показано, что использование ТЭГ представляет собой сложную схему, более простую конструкцию и более экономичную, чем устройства оперативного тока, работающие с использованием большого количества дорогостоящего оборудования, а также зарядного оборудования.

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04
ON AWARDING SCIENTIFIC DEGREES
AT THE NAMANGAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

FERGANA STATE TECHNICAL UNIVERSITY

NORBUTAYEV MASUDJON ABDURASULOVICH

**DEVELOPMENT OF EFFICIENT SEMICONDUCTOR
THERMOELECTRIC ENERGY SOURCES FOR USE IN PRODUCTION**

01.04.10 – Physics of semiconductors

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

The topic of the dissertation Doctor of Philosophy (PhD) on technical sciences is registered by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under No. B2024.3.PhD/T2839.

The dissertation was completed at the Fergana State Technical University.

The abstract of the dissertation is available in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is posted on the website of the Scientific Council (www.namdtu.uz) and on the Information and Educational portal "ZiyoNet" (www.ziynet.uz).

Scientific supervisor: **Kasimakhunova Anarkhan Mamasadikovna**
Doctor of Technical Sciences, Professor

Official opponents: **Quldashov Obbozjon Khokimovich**
Doctor of Technical Sciences, Professor

Alijonov Donyor Dilshodovich
Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences,
Associate Professor

Leading organization: **Karakalpak State University**

The defense of the dissertation will be held at 12⁰⁰ on "5" December 2025 at the meeting of Scientific Council PhD.03/30.11.2022.FM/T.66.04 at the Namangan State Technical University. (Address: 160115, Namangan city, Kasansay Str. 7, Namangan State Technical University, Building 6, 1st floor, Academic Council Room, tel. (+99869)228-76-68, 225-10-07, Fax: (+99869) 228-76-75. e-mail: info@namdtu.uz)

You can get acquainted with the dissertation work at the Information Resource Center of the Namangan State Technical University (registration number No. 85). Address: 160103, Namangan city, I.Karimov Str. 12, tel. (+99869) 234-14-85; Fax: (+99869) 234-19-96, e-mail: info@namdtu.uz

The abstract of the dissertation was sent on " 21 " 11 , 2025.
(mailing protocol No. 8 on " 21 " 11 2025)



U.I. Erkaboev
Chairman of Scientific Council on award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

A.Abdukarimov
Scientific Secretary of Scientific Council on award of Scientific Degrees, Doctor of Philosophy(PhD), Associate Professor

N.Sharibayev
Chairman of the Scientific Seminar at the Scientific Council on award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (PhD dissertation abstract)

The aim of the research work is to develop high-performance equipment for use in industrial enterprises based on thermoelectric converters made of p -BiSbTe and n-BiTeSe semiconductor materials.

The objects of the research were thermoelectric materials based on BiSbTe (p-type) and BiTeSe (n-type), silicon semiconductor material, capacitors and batteries obtained using a high-efficiency electrical discharge device.

The scientific novelty of the research consists of the following:

The technology for manufacturing thermoelectric generator elements based on p-BiSbTe/n-BiTeSe with high precision and efficiency has been improved using electro-erosion equipment;

For the first time, the linear thermal expansion coefficients (LTEC) of Bi₂Te₃-based thermoelectric materials along the “a” and “c” crystallographic directions in the temperature range of -55...+45 °C were modeled using the Grueniesen model, and the quantitative law of how their anisotropy affects the mechanical and thermal stability of the thermobattery design was determined;

For the first time, it was found that by changing the geometric dimensions of the thermoelement branches (length and cross-sectional area), it is possible to reduce the mismatch between the load and the optimal currents, and the exact geometric dependence of this mismatch was mathematically justified;

For the first time, an industrial-scale energy source was created based on a thermoelectric device operating at a temperature difference $\Delta T = 80-100$ °C, capable of simultaneously charging 120 kVar capacitors and accumulator batteries, as well as serving as an operational current source for the protection system;

A mathematical model has been developed to determine the energy characteristics of silicon-based thermoelectric generators operating in high-temperature ranges.

Implementation of research results. Based on the results of creating thermoelectric generators for the manufacturing industry and testing their parameters:

Thermogenerators designed for use in industrial enterprises have been implemented at the “Fergana Thermal Power Plant” JSC as a constant operational current source to supply the operational current circuits of relay protection devices with steady direct current (“Fergana TPP” JSC, reference No. 08-5/2007 dated August 30, 2024, on the implementation of research results). As a result, the enterprise achieved an economic efficiency of 8,324,000 UZS by supplying the operational current circuits of relay protection devices with thermobatteries as a constant current source.

The technology for manufacturing thermoelectric generator elements based on p-BiSbTe/n-BiTeSe with high precision and efficiency using electro-erosion equipment has been implemented at “FOTON” JSC (Uzeltexsanoat, reference No. 190 dated November 5, 2024). Consequently, it was recommended to produce sources capable of simultaneously charging 120 kVar capacitor banks and accumulator batteries, as well as serving as an operational current source for relay protection devices for industrial enterprises.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, general conclusions, a list of references, and appendices. The total volume of the dissertation is 116 pages.

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

I bo'lim (I chast, I part)

1. А.М.Касимахунова, М.И.Латипова, Н.Б.Тургунова, А.Т.Кибишов, М.О.Атажанов, **М.А.Норбутаев**. Система индуктивной зарядки аккумуляторной батареи с модулем беспроводной двусторонней связи bluetooth // РГП "Национальный институт интеллектуальной собственности" министерства юстиции республики Казахстан Патент на Полезную Модель № 11341 31.10.2025
<https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/Details?docNumber=430329>
2. А.М.Kasimakhunova, **М.А.Norbotaev**. Implementation of Thermoelectric Batteries for Power Supply of Compensating Devices and Relay Protection Elements // SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 10, Iss. 9, pp. 22-28, 2023. (№9, Scopus IF: 0.8, Q4) DOI: [10.14445/23488379/IJEEE-V10I9P103](https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V10I9P103)
3. **М.А.Norbutayev**. Influence of geometry of thermoelement branches on the values of the optimal current and efficiency of the thermal converter // Journal of Engineering and Technology (JET) – India, 2023. Vol. 13, Iss. 2. – pp. 149 - 156. (01.00.00; №31)
<https://www.tjprc.org/data/view-archives.php?journal=6&jtype=1>
4. А.М.Kasimaxunova, **М.А. Norbo'taev**. Ishlab chiqarish korxonalarida termoelektrik generatorlarni joriy etishning nazariy va amaliy jihatlari // Илмий хабарнома Физика-математика тадқиқотлари. – Андижон, 2025. № 2. - S. 44-52. (01.00.00; №13)
5. А.М.Kasimaxunova, **М.А.Norbo'taev**. Yuqori intensivlikdagi yorug'lik oqimida ishlovchi fototermogeneratorlar uchun kaskadli termobataryalarning samaradorligini tadqiq etish // Илмий хабарнома Физика-математика тадқиқотлари. – Андижон, 2025. № 2. - S. 52-57. (01.00.00; №13)
6. **М.А.Norbo'taev**. Termoelektrik energiya o'zgartirgichlarni modellashtirish orqali tadqiq qilish // Namangan davlat universiteti Ilmiy axborotnomasi. – Namangan, 2025. № 8. - S. 70-78. (01.00.00; №14)
7. А.М.Kasimakhunova, **М.А.Norbutaev**. Modeling the impact of enhanced current density in thermoelectric generator branches on heat transfer processes // Buxoro davlat universiteti ilmiy axboroti - Buxoro, 2025. - № 10. pp. 113-118. (01.00.00; №3).

II bo'lim (II chast, II part)

8. А.М.Kasimaxunova, **М.А.Norbo'taev**, М.Варатова. Qishloq sharoiti uchun termoelektrik generator // FarPI ilmiy-texnika jurnali. – Farg'ona, 2021. – Max. son № 11. - S.119-123. (05.00.00; №20).
9. А.М.Касимахунова, **М.А.Норбутаев**. Степень рассогласования оптимального тока с рабочим током и влияние его на выходные параметры

- термоэлектрической батареи // Научно-технический журнал ФерПИ. – Фергана, 2023. - № 6. - С.176-184. (01.00.00; №20).
10. А.М.Касимахунова, **М.А.Норбутаев**. Termoelektrik generatorlarni ishlab chiqarish korxonalarida qo'llash masalalari // Mexanika va texnologiya. – Namangan, 2024. № 1. - S. 213-221. (05.00.00; <https://oak.uz/pages/4802>)
 11. **М.А.Норбутаев**. Зависимость оптимального тока и коэффициента полезного действия термопреобразователя от геометрии ветвей термоэлемента/ Muhandislik va iqtisodiyot -ijtimoiy iqtisodiy, innovatsion texnik, fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal. - Toshkent, 2025. № 8. - S.266-271. (05.00.00; <https://oak.uz/pages/4802>).
 12. А.Касимахунова, С.И.Зокиров, **М.А.Норбўтаев**. Фототермо-генератор селективного излучение с подвижной щелью // Международный сертификат на авторское произведение. – Germany, 2018. – № ЕС-01-002848.
 13. **М.А.Норбо‘таев**. Termobataryalarni foydali ish koeffitsientini aniqlash //Rasmiy axborotnoma. – Toshkent, 2023. – № 5(129). – DGU24550. – С. 441-442.
 14. А.М.Касимахунова, **М.А.Норбо‘таев**. Termoelektrogeneratorlarni elektr parametrlarini hisobga olishni modellashtirish // Rasmiy axborotnoma. – Toshkent, 2024. – № 6(279). – DGU39432. – С. 489-490.
 15. А.М.Касимахунова, **М.А.Норбо‘таев**. Termoelektrogeneratorlarni issiqlik parametrlarini hisobga olishni modellashtirish // Rasmiy axborotnoma. – Toshkent, 2024. – № 6(279). – DGU39432. – С. 491-492.
 16. А.М.Касимахунова, **М.А.Норбо‘таев**. Termobataryalarni samarador-ligini geometrik o'lchamlariga bog'liqligini modellashtirish // Rasmiy axborotnoma. – Toshkent, 2024. – № 8(281). – DGU41704. – С. 459-460.
 17. А.М. Касимахунова, **М.А.Норбо‘таев**. Termobataryalarni tayyorlashda materiallarini tanlashni modellashtirish orqali aniqlash // Rasmiy axborotnoma. – Toshkent, 2024. – № 8(281). – DGU41703. – С. 459-460.
 18. А.М.Касимахунова, Л.К.Мамадалиева, **М.А.Норбўтаев**. Механизм аномальные явления, происходящие в фотоэлектрических преобразователях//“Yarimo‘tkazgichlar va polimerlar fizikasining dolzarb muammolari” Respublika ilmiy-amaliy anjumani. Toshkent, 2022. – С. 198-200.
 19. С.Зокиров, **М.Норбутаев**. Тепловые явления в полупроводниках: термоэлектричество и термоэлектрические материалы //Conference on Digital Innovation:" Modern Problems and Solutions". -Farg‘ona, 2023. – С. 265-266.
 20. **М.Норбо‘таев**. Termoelektrik generatorlar elementlarida tok zichligini ortishi issiqlik taqsimotlariga ta'sirini comsol multiphysics dasturiy vositasidan foydalanib modellashtirish // “Fan va texnikaning rivojlanishida zamonaviy axborot texnologiyalarining o'rni” xalqaro ilmiy-texnikaviy anjumani. -Farg‘ona, 2023. – С. 171-177.
 21. **М.А.Норбо‘таев**. O‘zbekistonda termoelektrik generatorlardan foydalanish istiqbollari // So‘ngi ilmiy tadqiqotlar nazariyasi. -Toshkent, 2022. – С 269-273.
 22. **М.А.Норбутаев**. Theoretical analysis of the mechanism of light absorption in an impurity semiconductor // “Оптическим и фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро и наноструктурах” V Международной конференции. -Farg‘ona, 2020. – С. 63-65.

23. А.М.Касимахунова, **М.А. Норбутаев**. “Исследование возможности создания эффективных термоэлектрических преобразователей из кремния” // “Zamonaviy mikroelektronikaning rivojlanishida fan, ta’lim va innovatsiya integratsiyasi” Respublika ilmiy-uslubiy anjumani. – Andijon, 2020. -С. 150-153.
24. М.П.Абдуллаева, **М.А.Норбутаев**. Моделирование влияния повышения плотности тока в элементах термоэлектрических генераторов на распределение тепла // Известия национальной академии наук Кыргызской республики, (8), -Кыргызстан, 2023. -С. 236-240.
25. **М.А. Norbutayev**, М.Т.Тoshtemirov. Mujassamlangan kollektor-termogenerator qurilmasini yaratish va tadqiqot qilish // “XXI-asr intellektual yoshlar asri” Respublika ilmiy va ilmiy-nazariy konferensi. -Toshkent, 2021. 86-88 bet.
26. А.М.Касимахунова, **М.А.Норбутаев**. Моделирование термоэлектрического преобразователя с улучшенными характеристиками // “Axborot-kommunikatsiya texnologiyalari va telekommunikatsiyalarning zamonaviy muammolari va yechimlari” onlayn Respublika ilmiy-texnik anjumani. - Farg‘ona, 2021. 332-334 bet.
27. А.М.Касимахунова, **М.А.Норбутаев**, С.И.Зокиров. “Моделирование оптических и электрофизических характеристик фотоэлектрической части селективного фототермопреобразователя” // “Fizika fanining texnika sohasidagi tutgan o‘rni” Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi. Qoraqalpog‘iston, 2021. 16-18 betlar.
28. А.М.Касимахунова, **М.А.Норбутаев**. Актуальные задачи внедрения термоэлектрических источников тока в производство и пути повышения его эффективности // “Energetika istiqbollari va muammolarga zamonaviy yechimlar” xalqaro ilmiy-amaliy anjumani. -Namangan, 2022. 283-285 bet.
29. А.М.Касимахунова, **М.А.Норбутаев**. Муқобил энергия манбаларидан фойдаланиш йўлидаги самарали усуллар ва уларни таҳлили // “Energetika sohasini rivojlantirishda muqobil energiya manbalarining roli” vazirlik miqyosida ilmiy-amaliy konferensiyasi. - Namangan, 2022. 164-166 bet.
30. Зокиров С.И., Норбутаев М.А. Солнечный трекер для фототермогенератора селективного излучения // Universum: технические науки. 2021. Том 5. №4(85). <https://doi.org/10.32743/UniTech.2021.85.4-5.9-13>

Avtoreferat “Namangan davlat texnika universiteti ilmiy-texnika jurnali”
tahriridan o‘tkazildi va o‘zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi tekshirildi
(21 noyabr 2025 yil).

Bosishga ruxsat etildi 21.11.2025 y.
Bichimi 60X84 1/16, “Times New Roman”
Garniturada raqamli bosma usulida bosildi.
Shartli bosma tobog‘i 3. Adadi: 100. Buyurtma: № 47/12
NamDTU bosmaxonasida chop etilgan.
Namangan shahri, Kosonsoy ko‘chasi 7-uy.

