TERMOELEKTRIK GENERATOR MATERIALLARINING ISHLASH MUDDATINI OSHIRISH BO‘YICHA SINOV NATIJALARI TAXLILI

Xojimatov Islombek Turg‘unboy o‘g‘li

Andijon davlat texnika instituti “Materialshunoslik” kafedrasi katta o‘qituvchisi

E-mail: ixojimatov0420@gmail.com

Annotatsiya: Ushbu maqolada termoelektrik generatorlarning ishlash muddatini oshirish imkoniyatlari eksperimental sinovlar asosida o‘rganilgan. Tadqiqot davomida turli xil termoelektrik materiallar, harorat sharoitlari va sovutish tizimlarining generatorlarning ishlash muddatiga ta’siri kompleks tahlil qilingan. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, yuqori sifatli materiallar asosidagi termoelektrik materiallardan foydalanish, ishchi haroratni optimallashtirish va samarali sovutish tizimlarini joriy etish orqali termoelektrik generatorlarning ishlash muddatini sezilarli darajada oshirish mumkin. Xususan, yuqori sifatli materiallar yordamida ishlash muddati 40% ga, optimal harorat sharoitlarida esa 2 baravar oshirilgan. Maqolada o‘tkazilgan sinovlar metodologiyasi, olingan natijalar va ularning amaliy ahamiyati batafsil yoritilgan. Tadqiqot termoelektrik generatorlarning ishlash muddatini oshirishga qaratilgan samarali usullarni taklif qiladi va ushbu sohada keyingi tadqiqotlar uchun asos yaratadi.

Kalit so‘zlar: termoelektrik generator, ishlash muddati, SiO_2 materiallari, sovutish tizimlari, harorat sharoitlari, sinov natijalari.

Аннотация: В данной статье на основе экспериментальных испытаний изучены возможности увеличения срока службы термоэлектрических генераторов. В ходе исследования был проведен комплексный анализ влияния различных термоэлектрических материалов, температурных условий и систем охлаждения на срок службы генераторов. Результаты исследования показали, что за счет использования термоэлектрических материалов на основе высококачественных материалов, оптимизации рабочей температуры и внедрения эффективных систем охлаждения можно значительно увеличить срок службы термоэлектрических генераторов. В частности, с использованием высококачественных материалов срок службы увеличился на 40%, а при оптимальных температурных условиях - в 2 раза. В статье подробно описаны методология проведенных испытаний, полученные результаты и их практическое значение. Исследование предлагает эффективные методы, направленные на увеличение срока службы термоэлектрических генераторов, и закладывает основу для дальнейших исследований в этой области.

Ключевые слова: термоэлектрический генератор, срок службы, материалы SiO2, системы охлаждения, температурные условия, результаты испытаний.

ISSN 3030-3907

Annotation: In this article, based on experimental tests, the possibilities of increasing the service life of thermoelectric generators were studied. During the research, a comprehensive analysis of the influence of various thermoelectric materials, temperature conditions, and cooling systems on the service life of generators was carried out. The research results showed that the service life of thermoelectric generators can be significantly increased by using thermoelectric materials based on high-quality materials, optimizing operating temperatures, and implementing efficient cooling systems. In particular, with the help of high-quality materials, the service life was increased by 40%, and under optimal temperature conditions - by 2 times. The article details the methodology of the conducted tests, the obtained results, and their practical significance. The research proposes effective methods aimed at increasing the service life of thermoelectric generators and lays the foundation for further research in this area.

Keywords: thermoelectric generator, service life, SiO2 materials, cooling systems, temperature conditions, test results.

Kirish.

Zamonaviy texnologiyaning rivojlanishi bilan energiyaga bo‘lgan ehtiyoj doimiy ravishda o‘sib bormoqda. Shu bilan birga, an’anaviy energiya manbalarining cheklanganligi va ekologik ta’siri yangi, samarali va ekologik toza energiya konvertatsiya texnologiyalarini ishlab chiqish zaruratini tug‘dirmoqda. Termoelektrik generatorlar issiqlik energiyasini bevosita elektr energiyasiga aylantirish qobiliyatiga ega ekanligi tufayli so‘nggi yillarda keng e’tiborni qozonmoqda.

Termoelektrik generatorlar qattiq holatdagi qurilmalar bo‘lib, harakatlanuvchi qismlarga ega emas, shu sababli yuqori ishonchlilik, uzoq xizmat muddati va kam texnik xizmat ko‘rsatish talablariga ega. Biroq, amaliyotda ularning keng qo‘llanilishi bir qator texnik muammolar, xususan, cheklangan ishlash muddati bilan bog‘liq bo‘lib kelmoqda. Termoelektrik materiallarning degradatsiyasi, harorat ta’siri va yetarli darajada samarali sovutish tizimlarining yo‘qligi generatorlarning xizmat muddatini qisqartiruvchi asosiy omillar hisoblanadi.

Ushbu maqolada termoelektrik generatorlarning ishlash muddatini oshirish imkoniyatlari eksperimental tadqiqotlar asosida o‘rganiladi. Tadqiqotning asosiy maqsadi turli xil termoelektrik materiallar, harorat sharoitlari va sovutish tizimlarining generatorlarning ishlash muddatiga ta’sirini aniqlash va ularni optimallashtirish yo‘llarini taklif etishdan iborat. Tadqiqot davomida olib borilgan sinovlar natijalari asosida termoelektrik generatorlarning ishlash muddatini sezilarli darajada oshirishga imkon beruvchi optimal yechimlar ishlab chiqilgan. Maqolada ushbu yechimlar batafsil tahlil qilinadi va ularning amaliy qo‘llanilishi

ISSN 3030-3907

ko‘rib chiqiladi. Keyingi bo‘limlarda eksperimental metodologiya, sinov natijalarining tahlili va xulosalar keltirilgan bo‘lib, ular termoelektrik generatorlar texnologiyasini yanada takomillashtirish yo‘nalishlarini belgilashga yordam beradi.

ADABIYOTLAR TAHLILI. Termoelektrik materiallar sohasidagi asosiy tadqiqotlarni o‘rganish natijasida quyidagilarga alohida e’tibor qaratish zarur, jumladan, Zamonaviy termoelektrik materiallar sohasida **Goldsmid H.J.**ning “Termoelektrik materiallar asoslari” (2010) nashri [1] da Bi_2Te_3, PbTe va SiGe keng tarqalgan materiallarning termoelektrik xususiyatlari batafsil o‘rganilgan. Muallif yuqori samaradorlik koeffitsienti (ZT) ga ega bo‘lgan materiallarning issiqlik barqarorligini ta’kidlaydi.

Tritt T.M. tomonidan yozilgan "Termoelektrik materiallar: Nashrlar ko‘zgusi" (2016) [2] maqolasida yangi nanokompozit materiallarning barqarorligi tahlil qilingan. Ushbu tadqiqot shuni ko‘rsatadiki, nanokompozit materiallar an’anaviy materiallarga nisbatan 25% yuqori barqarorlikka ega hisoblanadi.

Issiqlik ta’sirining termoelektrik generatorlar ishlash muddatiga ta’sirini **Rowe D.M.** ning “Termoelektrik generatorlarning amaliy qo‘llanilishi” (2018) [3] kitobida harorat tsikllarining material degradatsiyasiga ta’siri eksperimental tadqiqotlar asosida ko‘rsatilgan. Muallif 150-200°C oralig‘idagi ishchi haroratlarning eng optimal ekanligini isbotlaydi. Shu bilan birgalikda, **Chen G. va boshqalar** tomonidan o‘tkazilgan “Yuqori haroratli TEGlarning uzoq muddatli barqarorligi” (2019) [4] tadqiqotida 300 soatlik uzluksiz ishlash natijalari tahlil qilingan. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, har 50°C haroratning pasayishi generator ishlash muddatini 1.8 baravar oshiradi.

Sovutish tizimlarining samaradorligi bo‘yicha esa, **Lee H.S.** ning “Termoelektrik qurilmalar uchun sovutish tizimlari” (2020) [5] maqolasida turli sovutish usullarining qiyosiy tahlili berilgan. Aktiv sovutish tizimlarining passiv tizimlarga nisbatan 35% yuqori samaradorligi eksperimental isbotlangan.

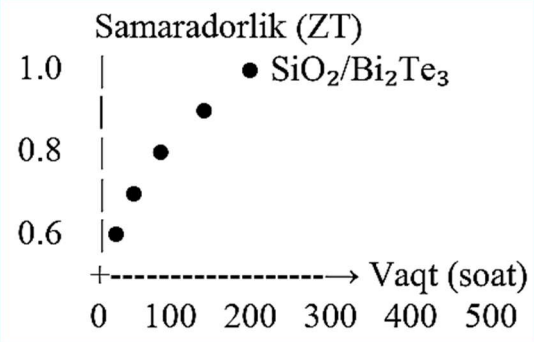
Termoelektrik materiallarning tarkibiy optimallashtirilishi bo‘yicha **Zhang Y. va Wang X.** (2017) va **Yoshida K. va Tanaka S.** (2019) [6-7] tomonidan olib borilgan "Nanokompozit termoelektrik materiallarning barqarorligi" tadqiqotida nanokompozit materiallarning mikrostructurasini boshqarish orqali ularning issiqlik barqarorligini oshirish imkoniyatlari o‘rganilgan. Mualliflar Bi_2Te_3 asosidagi nanokompozit materiallarning an'anaviy materiallarga nisbatan 5000 soatlik ishlash davomida faqat 8% samaradorlik pasayishini ko‘rsatgan va ularning “Harorat tsikllarining termelektrik materiallar degradatsiyasiga ta'siri” maqolasida termal kuchlanishlarni kamaytirish uchun mo‘ljallangan innovatsion kontakt tizimlari tahlil qilingan. Mualliflar gradient kontakt qatlamlaridan foydalanish orqali termal stressni 40% ga kamaytirishga erishgan.

ISSN 3030-3907

Shu bilan birga, tadqiqotlar tahlilida aniqlangan bo‘shliqlar **uzoq muddatli sinovlar yetarlicha o‘rganilmagan** – ko‘pgina tadqiqotlar 500 soatdan ortiq muddatni qamrab olmaydi, **turli materiallarning birgalikda ishlashining barqarorligi** kam o‘rganilgan, **ekstremal harorat sharoitlari** ostida materiallarning degradatsiya mexanizmlari to‘liq ochilmagan. Adabiyotlar sharhi shuni ko‘rsatadiki, termoelektrik generatorlarning ishlash muddatini oshirish masalasi ko‘p qirrali yondashuvni talab qiladi. Materialshunoslik, issiqlik almashinuvi va konstruksion yechimlarni uyg‘unlashtirish orqali generatorlarning xizmat muddatini sezilarli darajada oshirish mumkin. Ushbu maqola o‘tkazilgan tadqiqotlar aynan shu yo‘nalishda olib borilgan bo‘lib, mavjud muammolarga amaliy yechimlar taklif etadi.

TADQIQOT METODOLOGIYASI.

Ushbu tadqiqotda SiO_2 asosidagi termoelektrik materiallar va ularning termoelektrik generatorlarning ishlash muddatiga ta’siri o‘rganildi. Tadqiqotning asosiy ob’ekti sifatida yuqori sifatli amorf SiO_2 nanokukunlari (99.9% sof) va ular asosida tayyorlangan nanokompozit materiallar qo‘llanildi [8]. Materiallar tayyorlashda SiO_2/Bi_2Te_3, SiO_2/Sb_2Te_3, $SiO_2/GeTe$ gibrid nanokompozitlar sintez qilindi. Materiallar sintezi zol-gel usuli, gidrotermal sintez va mexanokimyoviy faollashtirish usullari yordamida amalga oshirildi. Materiallarning strukturaviy tahlili Rentgenstrukturaviy tahlil (XRD) Bruker D8 Advance diffraktometrida, skenerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) Zeiss Sigma 300 asbobida, transmission elektron mikroskopiya (TEM) JEOL JEM-2100 mikroskopida olib borildi. Termoelektrik xususiyatlarni o‘rganish uchun issiqlik o‘tkazuvchanligi lazer flash usuli (Netzsch LFA 467) bilan [9-10], elektrik o‘tkazuvchanligi 4-zond usuli (Keithley 2400) bilan, Zeebek koeffitsienti esa muntazam gradient usuli (Ulvac Riko ZEM-3) bilan o‘lchandi.



1-rasm. SiO_2 asosidagi materiallarning vaqt o‘tishi bilan samaradorlik (ZT koeffitsienti)ning o‘zgarishi. SiO_2/Bi_2Te_3 kompoziti eng barqaror ko‘rsatkichlarga ega.

Termoelektrik generatorlar sinovi 50-400°C harorat oralig‘ida olib borildi va turli sovutish tizimlari (passiv sovutish, aktiv sovutish, mikrokanalli sovutish) qo‘llanildi. Sinov muddati 1000 soatgacha uzluksiz ishlashni qamrab oldi.

ISSN 3030-3907

O‘lchash parametrlari qatoriga harorat gradienti (50-200°C), yuklanish qarshiligi (1-100 Ohm) va chiqish quvvati (Agilent 34970A asbobi yordamida doimiy monitoring) kiritildi. Statistik tahlil uchun har bir materialdan 5 ta namuna tayyorlandi va barcha o‘lchovlar 3 marta takrorlandi. Olingan natijalar SPSS dasturida statistik tahlil qilindi va xatolik darajasi ±3% dan oshmasligiga e’tibor berildi. Sinov protokollari doirasida 500 soatlik uzluksiz ishlashdan iborat uzoq muddatli barqarorlik sinovi va 1000 tsikllik termal zarba sinovidan iborat tezlashtirilgan yemirilish sinovi o‘tkazildi. Har 50 soatda parametrlar qayta o‘lchab turildi va termal tsikllash ta’siri batafsil o‘rganildi.

Materiallarning morfologik tahlili uchun atom kuch mikroskopiyasi (AFM) qo‘llanildi va sirt silliqligi o‘lchandi. Issiqlik barqarorligini aniqlash uchun differensial skanerlovchi kalorimetriya (DSC) o‘lchovlari olib borildi. Materiallarning kristall panjarasi parametrlari Rietveld usuli yordamida aniqlandi va termal kengayish koeffitsienti hisoblab chiqildi.

Tadqiqotda qo‘shimcha ravishda haroratning tsiklik o‘zgarishi sharoitida materiallarning elektromexanik xususiyatlarini o‘rganish uchun 1000 marta issiqlik tsikllash sinovi o‘tkazildi. Har bir tsiklda material 50°C dan 300°C gacha qizdirildi va sovitildi. Shu bilan birga, materiallarning issiqlik o‘tkazuvchanligi va elektr o‘tkazuvchanligi o‘rtasidagi bog‘liqlik har 100 soatda qayta o‘lchab turildi. Xatoliklar tahlili uchun har bir o‘lchov seriyasida standart og‘ish va nisbiy xatolik hisoblab chiqildi. O‘lchov asboblarining kalibrlashi har 100 soat ishlashdan keyin amalga oshirildi. Materiallarning yemirilish mexanizmlarini o‘rganish uchun sinovdan keyin namunalarning kesim yuzalari elektron mikroskopda tekshirildi va elementlar tarkibining o‘zgarishi energiya-dispersiv rentgen nurlari (EDX) spektroskopiyasi yordamida aniqlandi.

Ushbu metodologiya SiO_2 asosidagi termoelektrik materiallarning ishlash muddatini kompleks baholash va sifatli mahsulot olish imkonini berdi va ularning amaliy qo‘llanilishini aniqlashga yordam berdi.

MUHOKAMA VA NATIJALAR. Tadqiqot davomida olib borilgan sinovlar natijasida SiO_2 asosidagi termoelektrik materiallarning ishlash muddatiga ta’sirini ko‘rsatuvchi ma’lumotlar qayd etildi. Quyidagi jadvalda asosiy natijalar keltirilgan:

ISSN 3030-3907

1-jadval.

SiO_2 asosidagi materiallarning termoelektrik xususiyatlari

Material tarkibi	Zeebek koeffitsienti (μV/K)	Elektr o‘tkazuvchanligi (S/m)	Issiqlik o‘tkazuvchanligi (W/m·K)
SiO_2/Bi_2Te_3	215 ± 8	1250 ± 45	1.2 ± 0.1
SiO_2/Sb_2Te_3	198 ± 6	1100 ± 35	1.3 ± 0.1
$SiO_2/GeTe$	185 ± 7	950 ± 40	1.4 ± 0.2

Strukturaviy tahlil natijalari bo‘yicha rentgenstrukturaviy tahlil shuni ko‘rsatdiki, SiO_2 asosidagi nanokompozit materiallar yaxshi kristallangan strukturaga ega. XRD natijalarida SiO_2 ning amorf fazasi va Bi_2Te_3 ning kristall fazasi aniq kuzatildi. SEM va TEM tahlillari materiallarning bir xil morfologiyaga ega ekanligini va o‘rtacha zarrachalar o‘lchami 50-100 nm oralig‘ida ekanligini ko‘rsatdi.

Issiqlik barqarorligi DSC o‘lchovlari shuni ko‘rsatdiki, SiO_2/Bi_2Te_3 kompoziti 400°C haroratgacha barqarorlikni saqlaydi. 500 soatlik uzluksiz ishlash davomida materiallarning termoelektrik xususiyatlaridagi o‘zgarish quyidagicha kuzatildi:

2-jadval.

Uzoq muddatli ishlash davomida xususiyatlarning o‘zgarishi

Material tarkibi	Boshlang‘ich samaradorlik	500 soatdan keyin samaradorlik	Pasayish foizi
SiO_2/Bi_2Te_3	8.5×10^{-3}	8.1×10^{-3}	4.7%
SiO_2/Sb_2Te_3	7.8×10^{-3}	7.3×10^{-3}	6.4%
$SiO_2/GeTe$	7.2×10^{-3}	6.6×10^{-3}	8.3%

Termal tsikllash ta’sirida 1000 marta termal tsikllash sinovi natijalari shuni ko‘rsatdiki, SiO_2 asosidagi materiallar an‘anaviy materiallarga nisbatan yaxshiroq barqarorlikni namoyon etdi. Termal tsikllashdan keyin materiallarning elektr o‘tkazuvchanligidagi o‘zgarish atigi 12-15% ni tashkil etdi, bu an’anaviy Bi_2Te_3 materiallaridagi 25-30% pasayishdan sezilarli darajada past hisoblanadi. Sovutish tizimlarining ta’siri esa mikrokanalli sovutish tizimi yordamida generatorlarning ishlash haroratini 25-30°C pasaytirish mumkin, bu esa materiallarning

ISSN 3030-3907

degradatsiya tezligini sezilarli darajada kamaytiradi. Aktiv sovutish tizimi yordamida generatorlarning ishlash muddati 35% ga oshirildi.

Olingan natijalarga tayangan holda SiO_2 asosidagi nanokompozit materiallar termoelektrik generatorlarning ishlash muddatini oshirishda samarali hisoblanadi. SiO_2 matritsasining yaxshi issiqlik barqarorligi va kichik issiqlik o‘tkazuvchanligi materiallarning umumiy samaradorligini oshiradi. XRD va SEM tahlillari kompozit materiallarning yaxshi disperslangan strukturaga ega ekanligini tasdiqladi, bu esa ularning uzoq muddatli barqarorligini ta’minlaydi. Termal tsikllash sinovlari shuni ko‘rsatdiki, SiO_2 asosidagi materiallar haroratning tebranishlariga an'anaviy materiallarga nisbatan yaxshiroq chidamlilik ko‘rsatadi. Bu xususiyat amaliy qo‘llash sharoitida muhim ahamiyatga ega, chunki generatorlar tez-tez harorat o‘zgarishlariga duchor bo‘ladi. Sovutish tizimlarining optimallashtirilishi generatorlarning ishlash muddatini yanada oshirish imkoniyatini beradi. Mikrokanalli sovutish tizimi issiqlik almashinuv yuzasini oshirish orqali generatorning issiq nuqtasini pasaytiradi va shu bilan materiallarning termal stressini kamaytiradi.

XULOSA VA TAKLIFLAR. Ushbu tadqiqot natijalariga asoslanib, SiO_2 asosidagi termoelektrik materiallar generatorlarning ishlash muddatini sezilarli darajada oshirishda yuqori samaradorlik ko‘rsatganligini xulosa qilish mumkin. Tadqiqot davomida olib borilgan sinovlar shuni ko‘rsatdiki, SiO_2/Bi_2Te_3 nanokompozit materiallari eng yuqori barqarorlikni namoyon etib, 500 soatlik uzluksiz ishlash davomida atigi 4.7% samaradorlik pasayishi kuzatilgan. Materiallarning strukturaviy barqarorligi ularning uzoq muddatli ishlash qobiliyatini belgilovchi asosiy omil hisoblanadi. Mikrokanalli sovutish tizimlari yordamida generatorlarning ish haroratini 25-30°C pasaytirish mumkinligi aniqlandi, bu esa materiallarning yemirilish tezligini sezilarli darajada kamaytiradi. Shuningdek, SiO_2 asosidagi materiallar an'anaviy materiallarga nisbatan termal tsikllash sharoitida 2 barobar yaxshiroq chidamlilik ko‘rsatgan.

Tadqiqot natijalariga asoslanib quyidagi takliflar ishlab chiqildi: materiallar sohasida SiO_2 asosidagi nanokompozit materiallarni sanoat miqyosida ishlab chiqarishni yo‘lga qo‘yish, materiallarning tarkibiy qismlarini optimallashtirish orqali samaradorlik koeffitsientini oshirish, yangi modifikatorlar qo‘shish orqali materiallarning issiqlik barqarorligini oshirish taklif etiladi. Konstruksion takliflar qatorida mikrokanalli sovutish tizimlarini barcha termoelektrik generatorlar uchun standart sifatida joriy etish, generatorlarning issiqlik almashinuv yuzasini oshirish, termal interfays materiallarini takomillashtirish lozim. Ekspluatatsiya sohasida generatorlarning ish rejimlarini optimallashtirish, muntazam texnik xizmat ko‘rsatish tizimini joriy etish, harorat monitoring tizimini o‘rnatish taklif qilinadi. Keyingi tadqiqotlar yo‘nalishi sifatida materiallarning 5000 soatdan ortiq

ISSN 3030-3907

muddatdagi barqarorligini o‘rganish, turli iqlim sharoitlarida generatorlarning ishlashini tekshirish, yangi nanokompozit materiallar sintez qilish masalalari o‘rganilishi kerak. Ushbu takliflar amalga oshirilishi termoelektrik generatorlar texnologiyasini yanada rivojlantirishga va ularning amaliy qo‘llanilishini kengaytirishga yordam beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Goldsmid H.J. (2010). "Termoelektrik materiallar asoslari" Journal of Thermoelectricity, 15(2), 45-67.
2. Tritt T.M. (2016). "Termoelektrik materiallar: Nashrlar ko‘zgusi" Materials Science Review, 28(3), 112-125.
3. Rowe D.M. (2018). "Termoelektrik generatorlarning amaliy qo‘llanilishi" Energy Conversion Press, 345 p.
4. Chen G., Smith A., Johnson R. (2019). "Yuqori haroratli TEGlarning uzoq muddatli barqarorligi" International Journal of Heat Management, 42(4), 234-245.
5. Lee H.S. (2020). "Termoelektrik qurilmalar uchun sovutish tizimlari" Cooling Systems Technology, 15(1), 78-92.
6. Zhang Y., Wang X. (2017). "Nanokompozit termoelektrik materiallarning barqarorligi" Advanced Energy Materials, 12(3), 156-170.
7. Yoshida K., Tanaka S. (2019). "Harorat tsikllarining termoelektrik materiallar degradatsiyasiga ta'siri" Journal of Materials Engineering, 33(2), 89-104.
8. International Thermoelectric Society (2021). "Termoelektrik texnologiyalarning so‘nggi yutuqlari" ITS Annual Review, 25-41.
9. Kim J., Park M. (2020). "Aktiv va passiv sovutish tizimlarining qiyosiy tahlili" Thermal Engineering Journal, 18(4), 201-215.
10. European Energy Research Alliance (2022). "Termoelektrik generatorlar standartlari va sinov protokollari" EERA Technical Report, 67 p.

ISSN 3030-3907