

9-Технические науки

ПОВЫШЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДОБРОТНОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

М.Б.Набиев., С.М.Зайнолобидинова., О.В.Тиллабоева., Д.Д.Гуломжонова

Ферганский Государственный университет¹. г.Фергана., ул. Мураббийлар

19. Узбекистан.

mbnabiyev@gmail.com

В статье теоретической и экспериментально рассмотрен случай экстремальные режимы работы полупроводниковых термоэлементов с использованием импульсов тока специальной формы режиме при нестационарного термоэлектрического охлаждения.

Ключевые слова: Эффективность, экстремальные случаи, режимы, охлаждения полупроводник, термоэлемент.

HAR XIL EKSTREMAL REJIMLARDA STATSIONAR BO'LMAGAN TERMOELEKTRIK SOVUTISHNING TERMOELEKTRIK KO'RSATKICHINI OSHIRISH

М.Б.Набиев., С.М.Зайнолобидинова., О.В.Тиллабоева., Д.Д.Гуломжонова

Фарғона давлат университети. Фарғона ш. Мурраббийлар кўчаси, 19 уй.

mbnabiyev@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Мақолада ностационар совутиш жараёнлари учун импульс токнинг махсус формадаги тўғри бурчакли ток услуги, яримўтказгич термоэлементлар ишлашидаги экстремал услублари назарий ва экспериментал тадқиқот натижалари тадқиқ этилган.

Калит сўзлар: Самарадор, экстремаль холат, услублар, совуқлик, ярим ўтказгич, термоэлемент.

INCREASING THE THERMOELECTRIC FIGURE OF MERIT OF NON-STATIONARY THERMOELECTRIC COOLING IN VARIOUS EXTREME MODES

M.B. Nabiyeu., S.M.Zaynolobidinjva., O.V.Tillaboeva., D.D.Gulomjonova

Fergana State University1. Fergana. Uzbekistan.

mnbabiyeu@gmail.com

ABSTRACT

The theoretical and experiment, the case of extreme operating conditions of semiconductor thermocouples using a special form of current pulses mode when a non-stationary thermoelectric cooling.

Key words: *Effektiv, extremum, metods, cooling, semiconductor, thermocouples, thermoelement.*

КИРИШ (ВВЕДЕНИЕ)./INTRODUCTION /

Основное внимание уделено анализу термоэлектрической добротности (эффективности) Z и критерия ZT , введенных А.Ф.Иоффе.

В 1911г. Е.Альтенкирх разработал теорию термоэлектрического охлаждения и получил термодинамические выражения для основных параметров термоэлектрического холодильника. Однако, исходя из естественного для начала XX в. предположения, что наилучшими материалами ветвей термопары являются металлы, подчиняющиеся закону Видемана-Франца. Однако Альтенкирх пришел к ошибочному выводу, что термоэлектрические холодильники из-за малой экономичности не могут иметь практического значения.

В 1948-50 гг. А.Ф.Иоффе [1] разработал теорию энергетических применений полупроводниковых термоэлементов, в которой показал, что полупроводниковые холодильники могут, с точки зрения экономичности, соперничать с современными холодильными машинами. Введение и физическое осмысление параметра Z явилось определяющим фактором для поисков новых термоэлектрических материалов, которые начали вести в ЛФТИ, а затем в 1953-71 гг. были продолжены и расширены в Институте полупроводников[1].

ADABIYOTLAR TAHLILI (ЛИТЕРАТУРА И МЕТОДОЛОГИЯ/METHODS)

Однако в теории Иоффе [1] был рассмотрен только стационарный режим термоэлектрических охлаждающих устройств. При этом было показано, что максимально возможное термоэлектрическое охлаждение в стационарном

режиме может достигнуть величины ΔT_{\max} см.(6.4)[3]. Более удобно по сравнению с

$$(T_0 - T_1)_{\max} = \Delta T_{\max} = \frac{1}{2} Z T_1^2$$

является нижеуказанной формуле (1), в которой в правой части не содержится неизвестная величина T_1 :

$$\Delta T_{\max}/T_0 = (\sqrt{1 + 2ZT_0} - 1)(\sqrt{1 + 2ZT_0} + 1)^{-1} \quad (1)$$

Проведем обозначение $\theta_{\max} = \Delta T_{\max}/T_0$. Достижение ΔT_{\max} в стационарном режиме осуществляется при вполне определенном оптимальном токе $I_0 = \alpha T_1/r$, где r -сопротивление термоэлемента. При токе I_0 оптимальным образом осуществляется конкуренция поглощающегося на спаях тепла Пельтье, выделяющегося в объеме термоэлемента тепла Джоуля, половина которого (в первом приближении) поступает на холодный спай термоэлемента, и теплого потока от горячего спая к холодному, обусловленного теплопроводностью ветвей термоэлемента. Важно отметить, что параметр Z , которым определяется максимально возможное снижение температуры, не зависит от геометрических параметров термоэлемента. Это объясняется подобием теплового электрического сопротивления при стационарном режиме. Максимально возможное снижение температуры на термоэлементе достигается при отсутствии тепловой нагрузки на холодный спай. Перейдем к качественному рассмотрению нестационарного термоэлектрического охлаждения (НТЭО), в нестационарном режиме в отличие от стационарном начинает сказываться инерционность тепловых процессов. Поглощение тепла Пельтье происходит лишь в тонкой области холодного спая. Поэтому такой процесс можно считать практически безинерционным. Джоулево тепло выделяется во всем объеме термоэлемента, инерционность распространения этого тепла определяется размерами устройства [2].

За малый промежуток времени в нестационарном режиме до холодного спая дойдет значительно меньшая доля Джоулева тепла, чем в стационарном режиме. Следовательно, и эффект охлаждения нестационарном режиме будет иным. Основным вопросом теории НТЭО является вопрос о максимально достигаемом эффекте охлаждения. Однако не менее важен и вопрос достижения ускоренного выхода в стационарное состояние охлаждающего термоэлемента, так как для режима оптимального тока I_0 время это лимитируется длиной термоэлемента [4].

В настоящей работе представлен анализ исследований нестационарного термоэлектрического охлаждения, проведенных в последние годы, и обсуждены перспективы применения таких модулей в различных областях. Эффективности нестационарного термоэлектрического охлаждения в различных экстремальных

режимов основан на различной локализации теплоты Пельтье и Джоуля в теле термоэлемента, в результате чего амплитуда перепада температур возрастает, но на короткое время[5] Время поддержания низкой температуры в режиме нестационарного термоэлектрического охлаждения (НТЭО) названо временным эффектом.

Проблема нестационарного охлаждения привлекла к себе внимание многих исследователей как в СНГ и Узбекистан, г. Фергана, ФерГУ так и зарубежом. Повышения эффективности нестационарного термоэлектрического охлаждения в различных экстремальных режимов, определяется двумя параметрами: глубиной охлаждения (ΔT) и временем поддержания низкой температуры ($\Delta \tau$). Однако, имеющиеся к настоящему времени данные теоретические и экспериментальные исследования нестационарного термоэлектрического охлаждения (НТЭО) не раскрыли все его потенциальные возможности. Развитие в области нестационарной генерации тока авторами[2] носили в основном расчетно-теоретический характер, однако ряд наиболее интересных с точки зрения практики возможностей работ[2] был исследован также и экспериментально. Однако это не исчерпало интереса к экспериментальным режимам, термоэлектрической генерации тока, особенно в области высоких и низких температур. Одна из этих концепций нашла свое отражение в данной статье.

Работа посвящена следующим вопросам, касающимся дальнейшего повышения эффективности нестационарного термоэлектрического охлаждения различных экстремальных режимов НТЭО. В статье представлены теоретические и экспериментальные результаты исследований режима нестационарного термоэлектрического охлаждения с использованием полупроводниковых термоэлемента (ТЭ) большой длины. Известно, что метод (НТЭО) применяется для охлаждения малоинерционных объектов, в том числе пленочного типа, как приемники инфракрасного излучения, ПЗС матрицы и т.д. Суть метода заключается в запаздывании поступления на холодный спай избытка Джоулева тепла из массы термоэлемента (ТЭ) при токах, существенно больших чем оптимального. Существенным тормозом повышения ΔT во всех режимах (НТЭО) является: где контактное сопротивление холодного спае r_k . Поэтому дальнейший прогресс в вопросах применении режимов экстремальных тока являющегося наиболее эффективным с точки зрения получения максимальных ΔT может быть достигнут на путях уменьшения контактного сопротивления r_k в рамках модели полупространства, что реализуется в термоэлементах с большими длинами ветвей. В месте с тем, известно, что

инерционность полупроводниковых термоэлементов т.е. время выхода в рабочий режим пропорциональна квадрату длины его ветвей, поэтому переход к большой продолжительности процесса (НТЭО) и, следовательно, эксперименты на «длинных» ТЭ, с ветвями существенно больших длин, чем в предыдущих исследованиях, должен дать значительный выигрыш в ΔT . Это обусловлено тем, что при больших длинах термоэлемента процессы протекают более медленно и уменьшается и относительная роль Джоулевых тепловыделений при контактном слое. Охлаждение ΔT при $j = const$ $t \leq \frac{\ell^2}{a}$ описывается формулой

$$T(0,t) = T_0 + \frac{\rho a}{\chi} (j\sqrt{t})^2 - \frac{2\pi}{\chi} \sqrt{\frac{a}{\pi}} j\sqrt{t} \quad (2)$$

В случае тока, меняющегося во времени, $j=j(t)$, разность температур как функцию тока и времени $\Delta T_j(t)$, можно в соответствии с теоремой Дюамеля, приставить в виде

$$\Delta T(t_0) = \int_0^{t_0} \left[\frac{\Pi}{\chi} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \frac{\alpha(t)}{\sqrt{t_0-t}} - \frac{\rho a}{\chi} j^2(\tau) \right] d\tau$$

где t_0 - продолжительность импульса, ($\Pi = \alpha T$) при наличии r_k величина примет вид $\Pi - \frac{1}{2} j(\tau) \cdot r_k \cdot S$

$$\text{Тогда} \quad \Delta T(t_0) = \int_0^{t_0} \left[\frac{\Pi - \frac{1}{2} j(\tau) \cdot r_k \cdot S}{\chi} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \frac{j(\tau)}{\sqrt{t_0-\tau}} - \frac{\rho a}{\chi} j^2(\tau) \right] d\tau \quad (3)$$

Дифференцируя по j и приравнявая производную нулю, находим экстремальную форму тока, т.е. закон изменения тока, позволяющий в момент t_0 получить наибольшее охлаждение:

$$j_{\text{эксп}}(t) = \frac{\Pi}{2\rho\sqrt{\pi a(t_0-t)} + r_k \cdot S} \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), после интегрирования получаем выражение для $\Delta T(t_0)$ с учетом контактного сопротивления спая

$$\Delta T(t_0) = \Delta T_{\text{станц}}^{\text{max}} \cdot \frac{1}{\Pi} \ln \left(\frac{2\rho\sqrt{\pi a t_0}}{r_k S} + 1 \right) \quad (5)$$

Из формулы (5)-видно что охлаждение в режиме экстремального тока зависит от величины r_k . С увеличением контактного сопротивления - разность температур при данном t_0 уменьшается, стремясь к нулю при достаточно больших r_k . При данном охлаждении растет с увеличением длительности импульса t_0 в разности температур на спаях.

/EKSPERIMENTUSLUBI/METODIK EKSPERIMENTA/EXPERIMENTAL/

Нестационарное термоэлектрическое охлаждение на термоэлементах: режим прямоугольного импульса: При решении задачи о возможностях

нестационарного охлаждения с использованием импульсов тока прямоугольной формы была принята модель термоэлемента, когда ветви спаяны встык.

В реальном термоэлементе в спае присутствует переходное сопротивление r_k , обусловленное слоем припоя конечной толщины, металлической соединительной пластиной и наличием двух границ металл – полупроводник. Оценим влияние этого переходного сопротивления, считая, что на холодном спае (координата $x=0$) помимо поглощения тепла Пельтье происходит выделение тепла Джоуля, прямо пропорциональное r_k . Так как в силу симметрии рассматривалась одна ветвь, будем считать, что к одной ветви относится сопротивление $0,5 r_k$

При протекании по термоэлементу тока плотностью j на холодном спае выделится удельная мощность

$$w_p = \frac{1}{2} r_k j^2,$$

где $r_k = \rho_k l_k$ - сопротивление коммутационного слоя на единицу площади (ρ_k - удельное сопротивление коммутационного слоя, l_k - толщина сопротивления коммутационного слоя).

На рис.1 приведены результаты экспериментов, полученные на термоэлементах большой длины ($\ell=102$ мм), которые приведены значения в виде графике, описывающие изменения температуры холодного спае $T(0,t)$ различных при тока в зависимости от максимального перепада температур от величины кратности импульсов тока, при пиковом режиме без охлаждающего экрана. С ростом импульса тока на термоэлементе большой длины ($\ell=102$ мм) уменьшается величины охлаждения. Характерные данные имеют в области кратности тока от $K=3$ K -отношение тока импульса к оптимальному току до $K \neq 7$. Как видно из результатов экспериментов показало, что амплитуда охлаждения фактически не меняется. Отступление от теории нестационарные термоэлектрические охлаждения (НТЭО) по видимому связано только с влиянием излучения на боковые поверхности полупроводникового термоэлемента большой длины.

Указано на экспериментального применения охлаждаемого экрана ($t_s = -2^0 C$). Из этого видно, что результаты соответствует с результатами теории НТЭО; т.е. амплитуда охлаждения j уменьшается по всему исследованному диапазону токов [3,4,5] Пиковое охлаждение наблюдается при кратностях тока $K \geq 2$. Из за наличия контактного сопротивления r_k в импульсном режиме амплитуда охлаждения ΔT уменьшается с увеличением кратности тока.

При этом во всех случаях величина пикового охлаждения была меньше максимального стационарного значения. В момент достижения минимальной

температуры (т.е. максимального охлаждения) ток выключается во избранный разогрева, расплавления коммутационного слоя и раскрешения термоэлемента (особенно при больших токах). Из соображения расчетно-математического анализа для исследования были изготовлены термоэлементы с ветвями $\ell = 102$ мм полуцилиндрической формы. В качестве материала ветвей использовались зонно-плавленые кристаллы $Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3$ (р-тип) и $Bi_2Te_3 - Bi_2Se_3$ (н-тип) Средние значения физических параметров термоэлементов при комнатной температуре составляли: коэффициент термо-ЭДС $\alpha = 210 \cdot 10^{-6} \text{ В/}^\circ\text{К}$ удельная электропроводность $\chi = 1,45 \cdot 10^{-2} \text{ Вм/Ом} \cdot ^\circ\text{К}$. При этом термоэлектрическая добротность $Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi}$ составляла $Z = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. Для снижения теплопритока на боковые поверхности термоэлемента (ТЭ) использовался специально разработанный экран [3]. Эксперимент проводился в вакууме со степенью разрежения $P = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$.

Расчетное и с экспериментальным путем; была подобрана температура экрана $t_3 = -2^\circ\text{С}$, [3]. имитирующая адиабатическую изоляцию боковых поверхностей исследуемых термоэлементов в диапазоне температур 300-230 К. [3,4,5]. Учитывая, практическое отсутствие натекания тепла за счет теплопроводности воздуха в вакуумированной среде, была выбрана близкой к средней интегральной температуре термоэлемента с учетом температурной «параболы» в его ветвях. Эталонном для сравнения являлся термоэлемент с длиной ветвей 15мм, обладающий той же термоэлектрической добротностью Z . У двух исследуемых термоэлементов основного ($\ell = 102$ мм) и эталонного ($\ell = 15$ мм), коммутационные слой и токоведущие пластины были одинаковы. Также одинаково было их экспериментально определенное контактное сопротивление ($r_k = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$). На рис.1 представлены зависимости ΔT_{\max} от кратности (К) импульсного тока I прямоугольного импульса. На рис.2 представлены зависимости ΔT_{\max} от кратности (К) импульсного тока I по отношению к оптимальному току I_{opt} . Без защитной экрана с ростом амплитуды тока (величины К) на основном термоэлементе (ТЭ) ΔT падает, не согласуясь с теорией НТО для адиабатического ТЭ (кривая 1).

НАТИЈАЛАР(РЕЗУЛЬТАТЫ/RESULTS)ИИ(ОБСУЖДЕНИЕ/DISCUSSION)

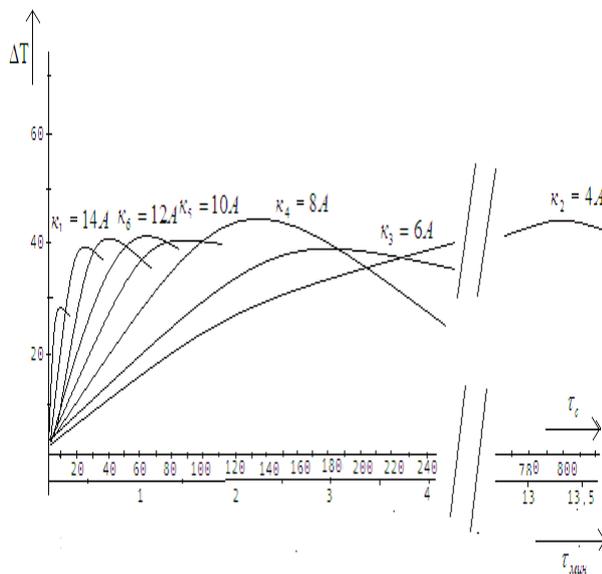


Рис.1. Режим прямоугольного импульса.

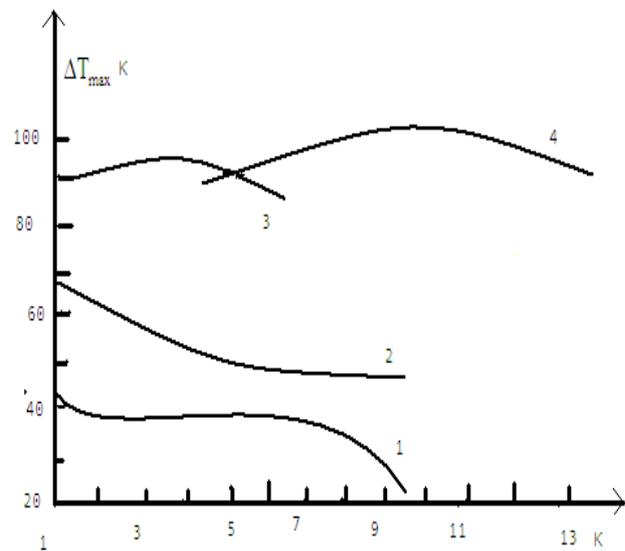


Рис.2. Зависимость максимального перепада температур ΔT_{\max} от величины кратности тока K .

При наличии экрана с имитирующей температурой $t_s = -2$ °C зависимость ΔT от K выравнивается в соответствии с теорией [2] для адиабатического ТЭ (кривая 2). Проведенные эксперименты, результаты типичных из которых показывают серьезные технические перспективы использования комбинированного режима НТЭО при условии применения термоэлементов с увеличенной длиной ветвей. В этом случае при тех же значениях термоэлектрической эффективности Z достигается большой эффект охлаждения (увеличивается общий достигаемый перепад температур). Следует отметить, что поскольку негативное влияние контактного сопротивления имеет относительный характер (R_k по отношению к полному сопротивлению ветвей термоэлемента) термин «большая длина ветви» также имеет относительный характер и при малых значениях площади поперечного сечения ветвей – «длинная ветвь» может иметь вполне конструктивные размеры по высоте (от 10см до 15см).

ХУЛОСА(ЗАКЛЮЧЕНИЕ /CONCLUSION/)

1. Результаты приведенных экспериментов по пиковому охлаждению на термоэлементах с большой длиной ветвей, показывает, что как и в случае обычных термоэлементов пиковое охлаждение в соответствии с теоретическими

предпосылкам, дает ΔT_{\max} меньшее, чем в стационарном режиме, хотя по абсолютной величине оно у термоэлементов с большой длиной ветвей несколько выше за счет меньшего влияния r_k -контактных сопротивлений.

2. На рис. 1 (режим прямоугольного импульса) представлена зависимость ΔT_{\max} от кратности импульсного тока J .

3. Без защитного экрана с ростом амплитуды тока (величины k) на основном ТЭ ΔT падает, которые не соответствует с теорией НТО адиабатического ТЭ. Экрана с имитирующей температурой ($t_s = -2^\circ\text{C}$) зависимость ΔT от K выравнивается в соответствии с теорией [4,5,6] для адиабатического термоэлемента.

4. Существенным тормозом повышения ΔT во всех режимах НТЭО является контактное сопротивление холодного спая r_k [2,3,4].

ADABIYOTLAR RO‘YXATI (ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА /REFERENS/

- [1]. A.F.Ioffe (1960) «Poluprovodnikovyye termoelementy. » Moskva
- [2]. Ye.K.Iordanishvili, V.P.Babin (1983) “Nestatsionarnyye protsessy v termoelektricheskix i termomagnitnyx sistemax preobrazovaniya energii”. Moskva, Nauka, S.215
- [3]. V.P Babin., Ye.K. Iordanishvili., M.B. Nabiyeu (1988) Jurnal texnicheskoj fiziki - , t. 52. Выр.№ 9. С. 1796-1798.
- [4]. M.B.Nabiyeu (1988) i dr. Выбор температуры охлаждаемого экрана для термоэлементов Izv. Vysshix ucheb .zavedeniy, Priborostroyeniye. Moskva, T.1, №8. С. 93-95.
- [5]. M.B.Nabiyeu (2017) i dr.” Izucheniye ekstremalnyx rejimov raboty v poluprovodnikovyx termoelementax s ispolzovaniyem rejim pryamougolnogo impulsa pri nestatsionarnom termoelektricheskom oxlajdenii”. Mejdunarodnaya konferentsiya. Aktualnyye problemy fiziki i ximii polimernyx kompozitov, a takje tehnologiya konstruktivnyx materialov» 12-13 iyulya. Namangan, Uzbekistan. S.126-130
- [6]. M.B.Nabiyeu.(2020) Monografiya: “Ekstremalnyye rejimy raboty poluprovodnikovyx termoelementov i ustroystv na ix osnove”. Izd.CIassic.Tashkent-Fergana.Tiraj100, S.114.
- [7]. M.B.Nabiyeu,(1998), I DRUGIE.. IFJ., t.71 №3 S.542-543.
- [8]. M.B.Nabiyeu.(2006) O temperature oxlajdayemogo ekrana dlya poluprovodnikovyx termoelementov. Materialy mejdunarodnoy konferentsii

posvyayuyennoy 15 letiyu nezavisimosti RUz.FTI. Tashkent, 26 - 27 oktyabrya. S.104-105

[9]. *Nabiyev M.B.,(2022) RESHENIYa ZADACHi O VOZMOJNOSTYaX NESTATSIONARNOGO TERMOELEKTRIChESKOGO OXLAJDENIYa S ISPOLBZOVANIYeM IMPULBSOV TOKA PRYaMOUGOLBNOY FORMY SAMMITI-2022. TASHKENT*

ADABIYOTLAR RO‘YXATI (ИСПОДЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА /REFERENS/

- [1]. А.Ф.Июффе «Полупроводниковые термоэлементы. » Москва 1960 г.
- [2].Е.К.Иорданишвили, В.П.Бабин “Нестационарные процессы в термоэлектрических и термомагнитных системах преобразования энергии”. Москва, Наука, 1983.С.215
- [3]. В.П Бабин., Е.К. Иорданишвили., М.Б. Набиев Журнал технической физики - 1988, т. 52. Вып.№ 9. С. 1796-1798.
- [4]. М.Б.Набиев и др. Выбор температуры охлаждаемого экрана для термоэлементов Изв. Высших учеб. заведений, Приборостроение. Москва, Т.1, №8. 1988. С. 93-95.
- [5]. М.Б.Набиев и др.” Изучение экстремальных режимов работы в полупроводниковых термоэлементах с использованием режим прямоугольного импульса при нестационарном термоэлектрическом охлаждении”. Международная конференция. Актуальные проблемы физики и химии полимерных композитов, а также технология конструктивных материалов» 12-13 июля 2017 год. Наманган, Узбекистан. С.126-130
- [6].М.Б.Набиев. Монография: “Экстремальные режимы работы полупроводниковых термоэлементов и устройств на их основе”. Изд.Сlassic.Ташкент-Фергана-2020.Тираж100, С.114.
- [7]. М.Б.Набиев, Х.О.Олимов, Р.Я.Расулов, А.А. Кодиров. ИФЖ.1998,т.71 №3 С.542-543.
- [8]. М.Б.Набиев. О температуре охлаждаемого экрана для полупроводниковых термоэлементов. Материалы международной конференции посвященной 15 летию независимости РУз.ФТИ. Ташкент, 26 - 27 октября. 2006. С.104-105.
- [9]. *Nabiyev M.B.,(2022) RESHENIYa ZADACHi O VOZMOJNOSTYaX NESTATSIONARNOGO TERMOELEKTRIChESKOGO OXLAJDENIYa S ISPOLBZOVANIYeM IMPULBSOV TOKA PRYaMOUGOLBNOY FORMY SAMMITI-2022. TASHKENT*