U holda, har bir $T > 0$ uchun shunday kompakt $K_T \subset [x_0, +\infty)$ mavjudki, ψ operator

$$\Psi(\rho)(t,x) = \Psi_0(t,x) + \Psi_F(t,x) + \Psi_B(\rho)(t,x)$$

$Q_{T,K}$ Banax fazosida yagona fiksirlangan nuqtaga ega bo'ladi [2].

Bu yerda:

$$\Psi_0(t,x) = S_{t,x}(t,\tau(t,x))\rho_0(\overline{X}(t,x)),$$

$$\Psi_F(t,x) = \int_{\tau(t,x)}^{t} S_{t,x}(t,s)F(s,X(s;t,x))ds,$$

$$\Psi_B(\rho)(t,x) = \int_{\tau(t,x)}^{t} S_{t,x}(t,s)G(\rho)(s,X(s;t,x))ds.$$

bunda

$$G(\rho)(s,X(s;t,x)) = \int_{X(s;t,x)}^{+\infty} B(y)k(y,X(s;t,x))\rho(s,y)dy \ .$$

Isbot. Yechimning mavjudligi $\dfrac{dM_1(t)}{dt} - aM_1(t) = 0$ 1-teoremadan kelib chiqadi. Yagonalikni isbotlash uchun (1)-tizimning ikkita yechimi ρ_1 va ρ_2 ni qaraymiz. Ularning ayirmasi $\rho = \rho_1 - \rho_2$ bo'lib, u $F = 0$, $\rho_{in} = 0$, $\rho_0 = 0$ shartlar ostida (1)-tenglamaning yechimi hisoblanadi hamda $C([0,T]; X)$ fazoga tegishlidir. Ψ_0, Ψ_F va Ψ_B funksiyalarni baholash orqali quyidagicha yozish mumkin:

$$\frac{d}{dt}\|\rho(t,\cdot)\|_X = -\int_{x_0}^{+\infty} \partial_x\big(g(x)\rho(t,x)\big)xdx$$

$$-\int_{x_0}^{+\infty} B(x)\rho(t,x)xdx + \int_{x_0}^{+\infty}\int_{x}^{+\infty} B(y)k(y,x)\rho(t,y)dydx$$

$$= \int_{x_0}^{+\infty} g(x)\rho(t,x)dx \le a\|\rho(t,\cdot)\|_X$$

Demak, $\rho_0(0) = \rho_{\text{in}}(0) = 0$ bir jinsli shartlar bajarilganda, tengsizlikni qo'llash orqali $\rho_1(t,x) = \rho_2(t,x)$ yechimlar teng ekanligi isbotlanadi. Mazkur teorema yordamida masala Volterra tipidagi integral tenglamaga keltiriladi [2]. Masalani yechimining mavjudligi va yagonaligi integral tenglamalar nazariyasiga asosan isbotlanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

[1]. B.Perthame. Transport Equations in Biology. Birkhäuser Verlag, Basel, 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7842-4

[2]. C.H.Nkwayep, F.S.Nyaweni, A.A.Saad, K.Thosago, U.Balteva, P.M.Tchepmo Djomegni and F.Hubert. Mathematical modeling of metastatic spreading by clusters. Preprint, 2024.

[3]. K.Iwata, K.Kawasaki and N.Shigesada. A dynamical model for the growth and size distribution of multiple metastatic tumors. J.Theoret. Biol., 203(2) (2000), p. 177–186. https://doi.org/10.1006/jtbi.2000.1075

Gulyamov Gafur (f-m.f.d., professor, Namangan davlat Texnika universiteti),
Umarov Qudiratulla Bekboyevich (f-m.f.n. dotsent, Namangan davlat Texnika universiteti),
Majidova Gulnoza Nurmuhammedovna (PhD, Namangan davlat Texnika universiteti;
E-mail: m.gulnoza.1985@gmail.com),
Madumarova Saodat Qudiratulla qizi (doktorant, Namangan davlat Texnika universiteti;
E-mail: saodatmadumarova0609@gmail.com)

P-N O'TISHLI DIODLARNING VOLT-AMPER HARAKTERISTIKASINI (VAX) NERST-ETTINGSGAUZEN EFFEKTI TA'SIRIDA O'ZGARISHI

Annotatsiya. *Ushbu maqolada Nernst–Ettingsgauzen effekti va tashqi magnit maydonning p–n o'tishli diodlarning volt-amper xarakteristikasiga (VAX) ta'siri nazariy jihatdan tadqiq etildi. Tadqiqot da-*

vomida harorat gradiyenti hamda magnit maydon ta'sirida hosil bo'ladigan termoelektr yurituvchi kuchning zaryad tashuvchilarning harakati, diffuziya jarayoni, rekombinatsiyasi va hajmiy zaryad sohasi parametrlariga ko'rsatadigan ta'siri matematik model asosida tahlil qilindi. Hisoblash natijalari shuni ko'rsatdiki, magnit maydon ta'sirida Lorens kuchi zaryad tashuvchilarning taqsimotini o'zgartirib, ularning harakatchanligini oshiradi hamda Nernst-Ettingsgauzen effekti hisobiga diodning volt-amper xarakteristikasida o'zgarmas kuchlanishda tok qiymatining ortishiga olib keladi. Olingan natijalar bir jinsli va bir jinsli bo'lmagan yarimo'tkazgichlar uchun taqqoslandi hamda p–n o'tishli diodlarning termomagnit xossalarini chuqurroq tushuntirish imkonini berdi. Tadqiqot natijalari magnit maydonga sezgir yarimo'tkazgichli datchiklar, termoelektr qurilmalar va yangi avlod elektron elementlarini yaratishda nazariy asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Kalit so'zlar: *p–n o'tishli diod, VAX -volt-amper xarakteristikasi, Nernst–Ettingsgauzen effekti, magnit maydon, Lorens kuchi, harorat gradiyenti, termoelektr yurituvchi kuch, zaryad tashuvchilar, diffuziya, rekombinatsiya, Xoll effekti.*

Гуламов Гафур (профессор физики и математики, Наманганский государственный технический университет),
Умаров Қудиратулла Бекбоевич (доцент, канд. наук ф-м., Наманганский государственный технический университет),
Мажидова Гулноза Нурмухамедовна (PhD, Наманганский государственный технический университет, E-mail: m.gulnoza.1985@gmail.com),
Мадумарова Саодат Кудиратулла кизи (докторант, Наманганский государственный технический университет; E-mail: saodatmadumarova0609@gmail.com)

ИЗМЕНЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК (ВАХ) P-N-ПЕРЕХОДНЫХ ДИОДОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭФФЕКТА НЕРНСТА-ЭТТИНГАУЗЕНА

Аннотация. *В данной статье теоретически исследовано влияние эффекта Нернста–Эттингсгаузена и внешнего магнитного поля на вольт-амперную характеристику (ВАХ) p–n-переходных диодов. На основе математической модели проанализировано влияние температурного градиента и возникающей термоэлектродвижущей силы на движение носителей заряда, процессы диффузии, рекомбинации и параметры области пространственного заряда. Показано, что под действием силы Лоренца изменяется распределение носителей заряда, увеличивается их подвижность, вследствие чего наблюдается возрастание тока при постоянном напряжении и изменение вольт-амперной характеристики диода. Проведено сравнение полученных результатов для однородных и неоднородных полупроводниковых структур. Полученные результаты могут быть использованы при разработке магниточувствительных полупроводниковых приборов, термомагнитных датчиков и электронных устройств нового поколения.*

Ключевые слова: *p–n-переход, вольт-амперная характеристика (ВАХ), эффект Нернста–Эттингсгаузена, магнитное поле, сила Лоренца, температурный градиент, термоэлектродвижущая сила, носители заряда, диффузия, рекомбинация, эффект Холла.*

Gafur Gulyamov (professor, Namangan State Technical University),
Umarov Qudiratulla Bekboyevich (Namangan State Technical University professor),
Majidova Gulnoza Nurmuhammedovna (PhD Namangan State Technical University; E-mail: m.gulnoza.1985@gmail.com),
Madumarova Saodat Qudiratulla qizi (doctoral student, Namangan State Technical University; E-mail:s aodatmadumarova0609@gmail.com)

CHANGE IN THE VOLTAGE-AMPEREQUIVALENT CHARACTERISTICS (VAX) OF P-N JUNCTION DIODES UNDER THE INFLUENCE OF THE NERST-ETTINGSHAUSEN EFFECT

Annotation. *This paper presents a theoretical investigation of the influence of the Nernst–Ettingshausen effect and an external magnetic field on the current–voltage (I–V) characteristics of p–n junction diodes. A mathematical model was developed to analyze the effect of the temperature gradient and the induced thermoelectric electromotive force on charge carrier transport, diffusion, recombination, and the space-charge region parameters. The results demonstrate that the Lorentz force modifies the charge carrier distribution, increases carrier mobility, and consequently leads to an increase in the diode current at a constant applied voltage, resulting in a noticeable change in the I–V characteristics. A comparative analysis was carried out for homogeneous and inhomogeneous semiconductor structures. The obtained results provide a theoretical basis for the development of magnetically sensitive semiconductor devices, thermomagnetic sensors, and next-generation electronic components.*

Keywords: *p–n junction diode, CVC-current–voltage characteristics, Nernst–Ettingshausen effect, magnetic field, Lorentz force, temperature gradient, thermoelectric electromotive force, charge carriers, diffusion, recombination, Hall effect.*

Kirish. So‘nggi yillarda yarimo‘tkazgich materiallari va ular asosida yaratilgan elektron qurilmalarni tashqi fizik omillar ta’sirida tadqiq etishga alohida e’tibor qaratilmoqda. Ayniqsa, magnit maydon, harorat gradiyenti va elektromagnit nurlanishning p–n o‘tishli diodlarning elektr parametrlariga ta’sirini o‘rganish yuqori sezgirlikka ega elektron va sensor qurilmalarni yaratishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etmoqda. Zamonaviy mikroelektronika, nanoelektronika hamda avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlarida qo‘llanilayotgan yarimo‘tkazgich elementlarining tashqi ta’sirlarga nisbatan sezgirligini aniqlash ularning ishonchliligi va funksional imkoniyatlarini oshirishda muhim omillardan biridir.

Termomagnit hodisalar orasida Nernst–Ettingsgauzen effekti alohida o‘rin egallaydi. Mazkur effekt harorat gradiyenti va magnit maydonning birgalikdagi ta’siri natijasida yuzaga kelib, zaryad tashuvchilarning harakat yo‘nalishi, taqsimoti va harakatchanligini o‘zgartiradi. Natijada yarimo‘tkazgich materiallarining elektr o‘tkazuvchanligi, rekombinatsiya jarayonlari hamda volt-amper xarakteristikalari sezilarli darajada o‘zgarishi mumkin.

Nernst-Ettingsgauzen effekti, asosan, bir jinsli yarimo‘tkazgichlarda keng o‘rganilgan bo‘lsa-da, ushbu effektning p–n o‘tishli diodlarning volt-amper xarakteristikasiga kompleks ta’siri yetarli darajada tadqiq etilmagan. Xususan, harorat gradiyenti va magnit maydonning birgalikdagi ta’sirida zaryad tashuvchilarning diffuziyasi, rekombinatsiyasi hamda hajmiy zaryad sohasi parametrlarining o‘zgarishi diodning elektr tavsiflariga qanday ta’sir ko‘rsatishi chuqur nazariy tahlilni talab etadi.

Mazkur ishning maqsadi Nernst-Ettingsgauzen effekti ta’sirida p–n o‘tishli diodlarning volt-amper xarakteristikasining o‘zgarishini nazariy jihatdan tahlil qilish, magnit maydon va harorat gradiyentining zaryad tashuvchilar harakati hamda diodning elektr parametrlariga ta’sir mexanizmlarini aniqlashdan iborat.

Muhokama. Bu ta’sirlarni avval bir jinsli yarimo‘tkazgichlar uchun ko‘rib chiqamiz. Ayni bir tomoni bo‘ylab temperatura gradiyentiga ega bo‘lgan yarim o‘tkazgichni shu gradiyentning yo‘nalishiga ko‘ndalang yo‘nalgan magnit maydoniga kiritgan vaqtda unda vujudga keladigan ikkilamchi hodisalar termomagnit hodisalar deb yuritiladi. Bu hodisalar ichiga bo‘ylama Nernst-Ettingsgauzen effektini ham oladi. Yarimo‘tkazgichda temperatura gradiyenti mavjud bo‘lsa unda albatta, termoelektr yurituvchi kuch yuzaga keladi. Agar bunday yarimo‘tkazgich o‘zidagi temperatura gradiyentiga perpendikulyar bo‘lgan magnit maydonga kiritilsa, termoelektr yurituvchi kuchning qiymati o‘zgaradi. Bu hodisaga bo‘ylama Nernst-Ettingsgauzen effekti deyiladi. Magnit maydoni bo‘lmasa, muvozanat sharoitida yarimo‘tkazgichning issiq tomonidan sovuq tomoniga o‘tayotgan zaryad tashuvchilar soni bilan sovuq tomondan issiq tomonga kelayotgan zaryad tashuvchilarning soni bir biriga teng bo‘ladi. Shuning uchun yarimo‘tkazgichda statsionar ermoelektr yurituvchi kuch yuzaga keladi.

Yarimo‘tkazgich magnit maydoniga kiritilsa, yuqoridagi hodisalar ta’sirida yarim o‘tkazgichdagi muvozanat buziladi va natijada ermoelektr yurituvchi kuchning kattaligi o‘zgaradi. Magnit maydoniga kiritilgan yarimo‘tkazgichda ermoelektr yurituvchi kuchning o‘zgarishini quyidagicha ifodalash mumkin.

$$U_{NE} = AB^2(T - T_0) \tag{1}$$

Natijalar.

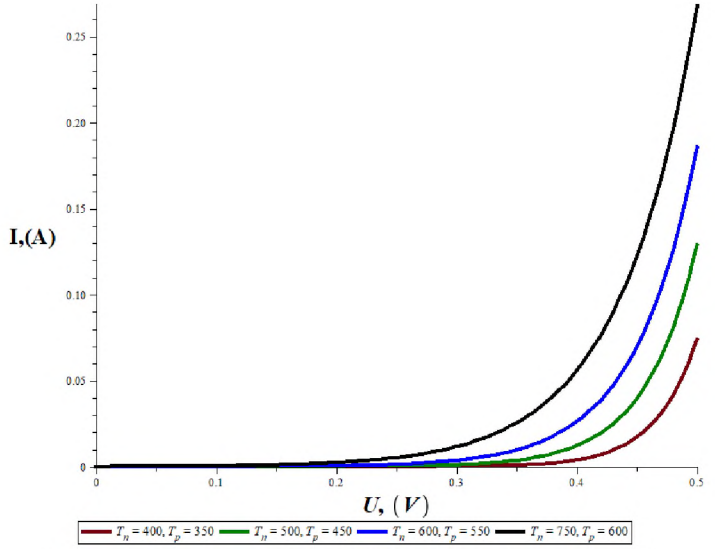
p-n o‘tishli yarimo‘tkazgichlarda n-sohada asosiy zaryad tashuvchilar elektronlar va p-sohada teshiklar deb oladigan bo‘lsak, u holda p-n o‘tishning hajmiy zaryad sohasi chegarasidagi tola tokni quyida ko‘rinishda yozishimiz mumkin. Agar n sohadagi ektronlarning rekombinatsiya toklari quyidagicha bo‘ladi.

$$j_n = \frac{qn_n(e^{\frac{q\varphi_0}{kT} - \frac{q(\varphi_0 - U)}{kT_n}} - 1)}{\tau_n L_n} \tag{2}$$

p-sohadagi teshiklar rekombinatsiya toki esa quyidagicha bo‘ladi.

$$j_p = \frac{qp_p(e^{\frac{q\varphi_0}{kT} - \frac{q(\varphi_0 - U)}{kT_p}} - 1)}{\tau_p L_p} \tag{3}$$

(2) va (3) ifodalar yorgamida bir jinsli yarimo‘tkazgichga magnit maydon ta’sirida VAXni olaganimizda quyidagi grafikni olamiz.



1-rasm. Magnit maydon ta'sirida VAXning o'zgarishi.

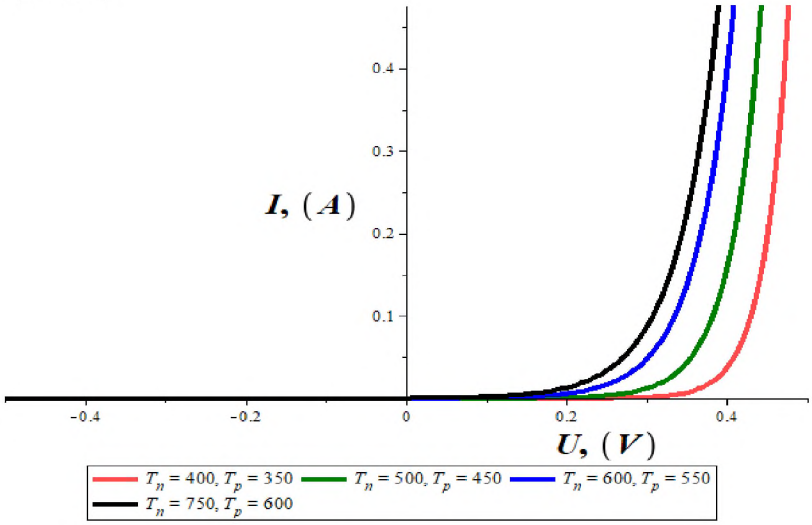
1-rasmdan ko'rinadiki, o'zgarmas magnit maydonda harorat o'zgarmas deb olsak, $T=T_n=T_p$ bo'lsa, qarshilik ortishi hisobiga umumiy tok kamayishi, aksincha, harorat turlicha bo'lsa $T \neq T_n \neq T_p$ u holda qarshilik kamayishi hisobiga tok ortishini kuzatishimiz mumkin.

Endi huddi shu effektni bir jinsli bo'lmagan yarimo'tkazgichlar uchun ya'ni, p-n o'tishli diodlar uchun tatbiq etib ko'raylik. Bunda diodning hajmiy soha chegarasidagi umumiy tokni ko'rib chiqamiz.

Umumiy tok esa $j = j_n + j_p$ bo'ladi. P-n o'tishli yarimo'tkazgichga maydon ta'sir etganimizda esa Nernst-Ettingsgauzen effekti natijasida umumiy tok o'zgarishiga sabab bo'ladi. Agar diodga o'zgarmas maydon berganimizda va zaryad tashuvchilar harakatchanligi bir xil deb qaralsa magnit maydon ta'sirida unga Xoll effekti ta'sirini to'liqligicha ko'rishimiz mumkin. Agar zaryad tashuvchilar harakatchanliklari va ularning temperaturalari ham turlicha bo'ladigan bo'lsa, u holda diodga Xoll effektidan tashqari Nernst-Ettingsgausen effekti tasiri ham bo'ladi. U holda tok qo'yidagicha tus oladi:

$$j = \frac{qn_n\left(e^{\frac{q\varphi_0}{kT}-\frac{q\left(\varphi_0-U-U_1+A_nB^2(T_n-T_0)\right)}{kT_n}}-1\right)}{\tau_n L_n} + \frac{qp_p\left(e^{\frac{q\varphi_0}{kT}-\frac{q\left(\varphi_0-U-U_1+A_pB^2(T_p-T_0)\right)}{kT_p}}-1\right)}{\tau_p L_p} \quad (4)$$

Biz diodga faqat Nernst-Ettingsgausen effekti ta'sirida hosil bo'ladigan tokga tajriba natijalarida olingan sonli qiymatlarini qo'yib hisoblab, volt-amper xarakteristikasini oladigan bo'lsak, uning quyidagi ko'rinishda bo'ladi (2-rasm):



2-rasm. Nernst-Ettingsgausen effekti ta'sirida VAXning o'zgarishi.

Diodda asosiy zaryad tashuvchilar temperaturasi T_n=750 gacha qiziydi deb oldik. 2-rasmdan shu xulosaga kelish mumkinki, agar p-n o‘tishli diodga magnit maydon ta’sir etganimizda Nernst-Ettingsgausen effekti natijasida zaryad tashuvchilar qizishi hisobiga o‘zgarmas kuchlanishda ham tok ortishini ko‘rishimiz mumkin.

Xulosa. Yuqorida olingan tahlillar shuni ko‘rsatdiki, magnit maydon va harorat gradiyenti birgalikda zaryad tashuvchilarning harakatlanish dinamikasini, ularning diffuziya jarayonini hamda hajmiy zaryad sohasidagi taqsimotini o‘zgartiradi. Natijada diodning volt-amper xarakteristikasi sezilarli darajada siljiydi va o‘zgarmas kuchlanishda ham tok qiymatining ortishi kuzatiladi. Bu esa Nernst-Ettingsgauzen effekti ta’sirida zaryad tashuvchilar energiyasining oshishi va ularning harakatchanligining ortishi bilan izohlanadi. Olingan natijalar bir jinsli hamda bir jinsli bo‘lmagan yarimo‘tkazgichlar uchun taqqoslanib, p–n o‘tishli diodlarning termomagnit xususiyatlarini chuqurroq tushunishga imkon beradi.

Tadqiqot natijalari magnit maydonga sezgir yarimo‘tkazgichli datchiklar, yuqori aniqlikdagi elektron qurilmalar hamda yangi avlod termomagnit elementlarini yaratishda nazariy asos sifatida xizmat qilishi mumkin. Kelgusida ushbu modelni tajriba natijalari bilan solishtirish va turli magnit maydon induksiyasi hamda harorat oralig‘ida eksperimental tekshirish ilmiy natijalarning ishonchliligini yanada oshiradi.

Tasdiqlash. Ish FZ-20200929243 "Yarimo‘tkazgichli quyosh fotoelementlar va nanostrukturalarning xarakteristikalaruga kuchli elektromagnit maydonda qizigan elektron va fononlarning ta`siri" fundamental tadqiqot grantlari asosida amalga oshirildi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

(1). Zhang X.-C., Xu J. (2010). Introduction to THz Wave Photonics. doi:10.1007/978-1-4419-0978-7 (https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0978-7)

(2). Шалимова К.В., Физика полупроводников. М.Энергоатомиздат, 1985, с. 113.

(3). Егиазарян Г., Стафеев В. Магнитодиоды и магнитотранзисторы и их применение. М.Радио и связь, 1987, с. 26.

(4). Chen J., Zhang X., Luo Z., Wang J., Piao H-G. Large positive magnetoresistance in germanium. Journal of Applied Physics 2014, 116, 114511, p. 1–5 http://dx.doi.org/10.1063/1.4896173

(5). Gulyamova G., Majidova G., R.Muhitdinovac F., Madumarova S. Diodning volt-amper xarakteritikasini turli ta`sirlarga sezgirligi. “NamDU ilmiy axborotnomasi”, 2022, 5-son, 38–46-betlar.

(6). Gulyamov G., Majidova G. Changes in diodes with a p-n-transition under the influence of microwave radiation. AIP Conference Proceedings 2023. 2700, 050008, p. 1–5 https://doi.org/10.1063/5.0126385

(7). G.Gulyamov, Q.Umarov, A.Soliyev, B.Shahobiddinov. Influence of heating of charge carriers on the contact resistance of the Schottky barrier, In AIP Conference Proceedings. Vol. 2924, 1, 050006. (2024). AIP Publishing LLC. https://doi.org/10.1063/5.0181554.

(8). M.G‘.Dadamirzaev, M.O.Kosimova, A.Makhmudov. Effect of Variation of Non-ideal Ratio on Electrical Properties of PN-Junction in Strong Microwave Field, Iran. J.Mater. Sci. Eng., 21(4). (2024). https://doi.org/10.22068/ijmse.3243.

(9). G.Gulyamov, G.Majidova. Romanian journal of Physics 68, (3–4), 110–115(2023). https:// rjp.nipne.ro/2023683-4/RomJPhys.68.607.pdf.

(10). G.Gulyamov, F.Mukhitdinova, G.Majidova. Changing the Voltage of the p-n Junction in a Magnetic Field, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology. (2023). https://doi.org/10.1380/ejssnt.2023-047.

(11). Gulyamov G., Majidova G., Muhitdinova F., S.Madumarova. (2024). Influence of a magnetic field on the characteristics of ap–n junction diode. J.Appl. Sci. Eng, *27*, 1911-1917

Raxmatullayeva Nilufar Alisherovna (I.M.Gubkin nomidagi Rossiya davlat Neft va gaz universiteti (Milliy tadqiqot universiteti) Toshkent shhridagi filiali, fizika-matematika fanlari nomzodi, «Matematika va informatika» kafedrasi dotsenti)

TIPINING O‘ZGARISH CHIZIG‘I UCHTA BO‘LGAN PARABOLIK-GIPERBOLIK TENGLAMA UCHUN BITSADZE-SAMARSKIY SHARTIGA O‘XSHASH SHARTLI MASALA

Annotatsiya. *Ushbu ishda tipining o‘zgarish chizig‘i uchta bo‘lgan ikkinchi tartibli parabolik-giperbolik tenglama uchun bir xil xarakteristik yo‘nalishdagi izlanayotgan funksiya hosilalari qatnashgan Bitsadze-Samarskiy shartiga o‘xshash shartli masalaning bir qiymatli yechilishi isbotlangan. Masala shartida soha chegarasidagi qiymatlar soha ichki nuqtalari yoki xarakteristikalardagi qiymatlar bilan bog‘langan. Yechimning yagonaligi energiya integrallari usuli yordamida ko‘rsatilgan. Yechimning mavjudligi esa masalani Volterra tipidagi integral tenglamalar sistemasiga keltirish va ularning yechimga egaligini isbotlash orqali asoslangan.*