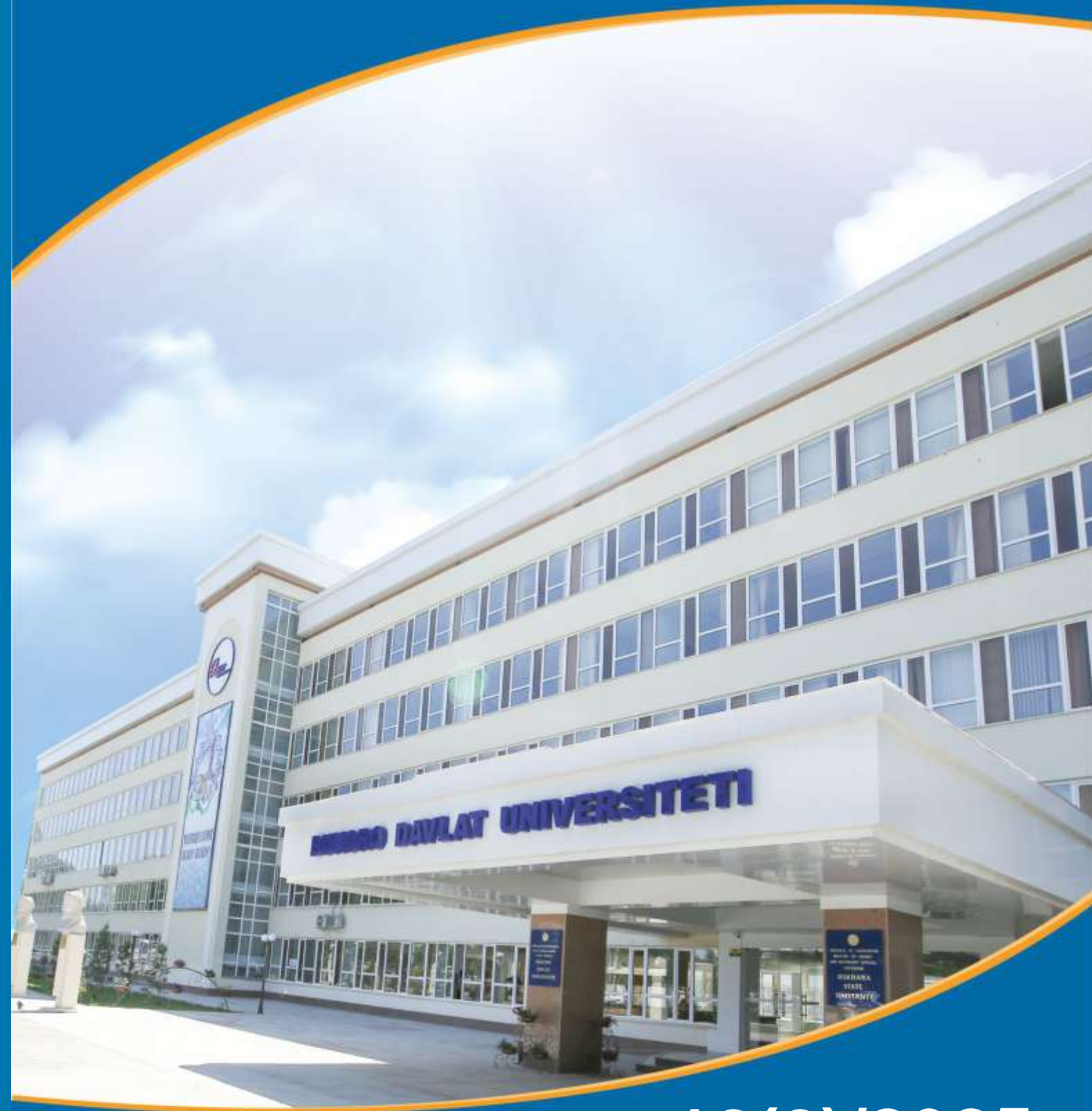




BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI ILMIY AXBOROTI



Научный вестник Бухарского государственного университета
Scientific reports of Bukhara State University

12(2)/2025



12(2)/2025

SERIYA: ANIQ VA TABIIY FANLAR

MUNDARIJA *** СОДЕРЖАНИЕ *** CONTENTS		
FIZIKA *** PHYSICS *** ФИЗИКА		
Abdugʻaniyev Y.A.	Yevropiy bilan legirlangan kremniyda magnitlanishning gisterezisi	4
Roʻziyev T.R., Axmedova U.F.	Erkin tebranishlar tushunchasi va fizik mohiyati	8
Axmedjanov F.R., Boltabayev A.F., Elboyeva M.I.	CaMoO ₄ kristallarida akustik toʻlqinlarda kollinear yorugʻlik difraksiyasi	13
Eshboʻriyev R., Ubaydullayeva M.A., Fayzullayeva M.L., Abdusamadova D.I.	Uran va plutoniy izotoplarini boyitilishi va ularni yadro reaktorlarida qoʻllanilishi	17
Axmedjanov F.R., Maharov N.M., Avdievich V.N.	Kubik simmetriyali kristallarining akustik xossalari anizotropiyasi va relaksatsiya vaqtlari	22
Mavlonov G.Kh., Uralbaev Kh., Tachilin S.A., Isakov B.O., Ibodullaev Sh.N.	Thermal stability of electrical parameters of silicon with nanoclusters of manganese atoms	27
Qoʻchqorova F.T., Mannonova M.S., Kengboyev S.A., Dusanova G.M.	Dinamikaning asosiy masalalari: moddiy nuqtaning dinamik harakat qonunlarini aniqlash usullari	32
Qodirov M.Q., Tuxtayev U.U., Muxammedov A.K., Ulasheva M.A., Nabiyev A.A.	Artezian quduq suvi tarkibidagi tabiiy (²²⁶ Ra, ²³⁸ U, ²³² Th, ⁴⁰ K) va texnogen ¹³⁷ Cs izotoplarining miqdori	37
Axmedov A.A., Tursunov A.R.	Datchiklarning asosiy va maxsus tavsiflari	43
Мадалиев М.Э., Носирова Н.А., Мухаммадёкубов Х.Э.	Численное моделирование трёхмерного течения за обратной ступенькой с использованием LES-модели	49

Илиев Х.М., Мухаммаджонов У.Х.	Цифровое моделирование процесса многоатомной диффузии в кремнии методом функционала плотности	58
Шоабдурахимова М.М.	Особенности неустойчивостей тока в компенсированном кремнии	62
Эргашева М.А., Кучкарова М.О.	Определение микроскопических параметров поверхности лазерным сканированием	67
Djuraev D.R., Sharipov M.Z., Fayziyev Sh.Sh., To‘xtayeva Sh.Q., Mo‘minov Sh.H.	Hajmiy ferromagnit kristallardagi bir o‘lchamli mikromagnit tizimlarning domen tuzilishi	71
Ибрагимов Ж.К., Эшбекова С.О., Абдуразаков М., Ашуров Н.Р.	Исследование термодинамического поведения композитов с изотактическим полипропиленом	77
Izzatillayev X.X., Quchqarov B.H.	GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs geterostrukturalarning modellashtirish natijalari	85
Soatov A.K., Turaev A.R.	Pressure-induced phase transitions and memristive behavior in mn- and co-doped ZnO oxide structures	90
Ergasheva A.A., Xalilov U.B.	IRMOF-8 ning nukleatsiyaoldi yig‘ilish mexanizmi: ReaxFF md asosidagi atomistik tahlil	95
Yokubbaev A.A.	Technology for manufacturing TiO ₂ -based solar cells	101
Beymamatova M.K., Sanetullaev A.Y.	Theoretical modeling of positron-emitting isotope production via projectile fragmentation of ¹² C Beams using the B _p -ΔE-B _p method	107
Kuchkarov Q.M., Ergashev B.A., Isaqov D.Z., Xurramov R.R., Mahmudov M.A.	KMDO usuli yordamida shisha va shisha\Mo tagliklarda o‘stirilgan Sb ₂ Se ₃ yupqa qatlamlarining morfologik va strukturaviy xususiyatlari	111
Turabdjjanov S.M., Kenjaev Z.T., Kulumbetov A.S-M.	Formation of nickel nanoclusters in p-type silicon: influence on electrophysical properties and surface topography	118
Dusmatov O.M., Toshov B.R., Kasimova F.U.	Kinematik qo‘zg‘alishlarda sterjenni matematik modellashtirish va dinamik xarakteristikalarini aniqlash	122

BIOLOGIYA *** BIOLOGY *** БИОЛОГИЯ		
Хасанов И.Х., Остонова Н.Х.	Пути повышения продуктивности пастбищ Бухарской области	131
Artikova N.T., Shadiyeva S.S.	Sugʻoriladigan tuproqlarning xossa xususiyatlari va tadqiqi (Buxoro tumani misolida)	135
Илёсов А.А.	Органик деҳқончиликда сидерат ўсимликларнинг аҳамияти	140
Шаропова Ш.Р., Саидов У.М., Бакаева С.С.	К изучению водно-болотной флоры Бухарской долины	149
KIMYO *** CHEMISTRY *** ХИМИЯ		
Raximov A.X.	Toshkoʻmir va kokos poʻstlogʻi asosida tayyorlangan aktivlangan koʻmirlar yordamida erkin qoldiq xlorni olib tashlash jarayonini baholash	153
Raximov A.X., Murodov D.D., Xurramov D.J.	Dehqonobod kaliy zavodida silvinit flotatsiyasida hosil boʻladigan shlamning samaradorlikka taʼsiri	160
INFORMATIKA *** INFORMATICS *** ИНФОРМАТИКА		
Toshpoʻlatova Sh.B.	SQLda maʼlumotlarni filtrlashda funksiyalardan foydalanish samaradorligi	166
Xoʻjayev S.S.	“BTEC” xalqaro dasturi qanday samara beradi?	171
Tursunov A.R., Axmedov A.A.	Oʻlchash qurilmalarida neyron tarmoqlardan foydalanish	174
Turdimatov M.M., Aliyev M.Gʻ.	Tashkilotlarda biznes uzluksizligini boshqarish tizimini modellashtirish usullari	180
Kabulov A.V., Oʻrinov N.T.	Universitet hisoblash tarmogʻi zaiflik koʻrsatkichlarini modellashtirishga asoslangan axborot xavfsizligi tizimi	185
TEXNIKA *** TECHNIQUE *** ТЕХНИКА		
Hamrayev J.H., Farmonov L.B.	GTL korxonalarida bugʻ qozonlarida bugʻ tayyorlash jarayonlarini mukammal boshqarish tizimlarini ishlab chiqish	195

YEVROPIY BILAN LEGIRLANGAN KREMNIYDA MAGNITLANISHNING GISTEREZISI

*Abdug‘aniyev Yo‘ldoshali Adashali o‘g‘li,
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika
universiteti, fizika-matematika fanlari bo‘yicha PhD
yoldoshaliabduganiyev2@gmail.com*

Annotatsiya. Yevropiy kirishma atomlarini kremniyga kiritish natijasida magnit nanoklasterlari shakllantirilgan p-tipli legirlangan kremniy namunalari magnit xususiyatlarini o‘rganish bo‘yicha tadqiqot natijalari keltirilgan. Bunda asosiy vazifa diffuziya usuli bilan olingan materialda elektron paramagnit rezonans xususiyatini o‘rganish, magnit qarshilikning elektr va magnit bo‘yicha o‘zgarishi qonuniyatlarini o‘rnatish, xona haroratida magnitlanish gisterizisi tashqi magnit maydon ta‘siriga bog‘liqligini aniqlashdan iborat.

Kalit so‘zlar: gisterezis, diffuziya, magnit qarshilik, ferromagnit, konsentratsiya.

ГИСТЕРЕЗИС НАМАГНИЧЕННОСТИ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ЕВРОПИЕМ

Аннотация. Представлены результаты исследования магнитных свойств образцов кремния, легированного р-типом, в которых в результате введения в кремний легирующих добавок европия формируются магнитные нанокластеры. Основная задача – изучение свойств электронного парамагнитного резонанса в материале, полученном методом диффузии, установление закономерностей изменения магнитосопротивления в электрическом и магнитном направлениях, а также определение зависимости гистерезиса намагниченности при комнатной температуре от воздействия внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: гистерезис, диффузия, магнитосопротивление, ферромагнетизм, концентрация.

MAGNETIZATION HYSTERESIS IN EUROPIUM-DOPED SILICON

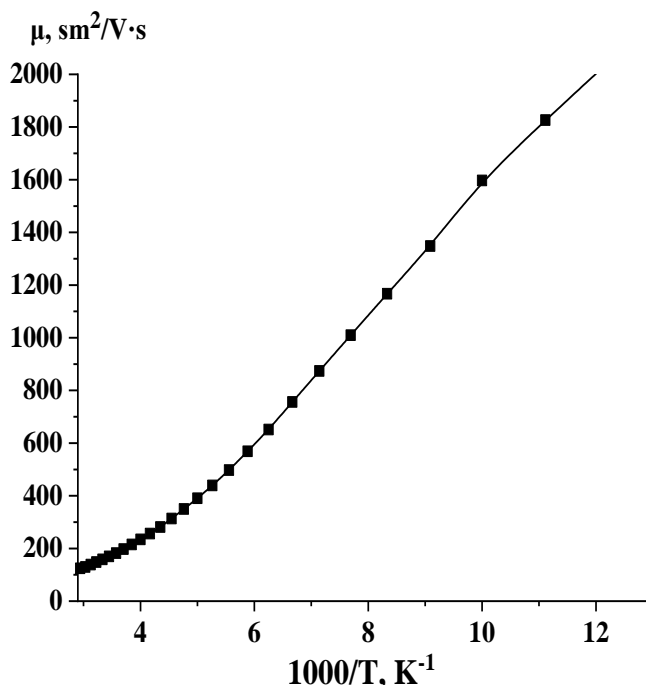
Abstract. The results of a study on the magnetic properties of p-type doped silicon samples are presented, in which magnetic nanoclusters are formed as a result of introducing europium doping additives into the silicon. The main objectives are to investigate the electron paramagnetic resonance properties in the material obtained by the diffusion method, to establish patterns of magnetoresistance changes in electrical and magnetic directions, and to determine the dependence of magnetization hysteresis at room temperature on the influence of an external magnetic field.

Key words: hysteresis, diffusion, magnetoresistance, ferromagnetism, concentration

Kirish. Adabiyotlarning ilmiy tahlili asosida lantanoid elementlarning kirishma atomlari kiritilgan kremniyda ferromagnitizm holatining kuzatilishi kirishma atomlarning magnit momentlarini qattiq hajmida o‘zaro parallel tartiblanishi bilan izohlangan. Metallarda elektronlarning konsentratsiyasi ko‘p bo‘lganligi uchun ularning spinlarini boshqarish nisbatan oson bo‘ladi [1]. Ishda ko‘rsatib o‘tilgandek yarimo‘tkazgichli qurilmalar odatda elektronlarning zaryadidan foydalanadilar, magnit materiallar esa elektron spin bilan bog‘liq ma‘lumotlarni yozib olish uchun ishlatiladi. Yarimo‘tkazgichlarda ferromagnit material olish uchun hammda elektronlarning zaryadi va spinidan foydalanish magnit bo‘lmagan yarimo‘tkazgichlarga magnit elementlarning yuqori konsentratsiyasini kiritish mumkin. Kremniyga yuqori spin tartiblanish xususiyatiga ega lantanoid guruhiga mansub elementlarning kirishma atomlarini kiritish orqali boshlang‘ich kremniyning magnit xossasini o‘zgartirish mumkinligi [2] ishda ko‘rsatib berilgan. Olingan natijalar yarimo‘tkazgich kremniy materialini spintronikada magnit datchiklarni yaratishda foydalanish imkoniyatini beradi, masalan, spin tranzistorlarni ishlab chiqarishda. 4f– guruh elementlarining kirishma atomlarini kremniyga kiritib, uning magnit xususiyatlarini boshqarishga qiziqish ortib bormoqda. Eu atomlarining tashqi elektron qobiqlaridagi $4f^7$ elektronlar spini $S=7/2$ ga teng. Eu va kirishma atomlarining kremniyga kiritib uning magnit xususiyatlarini o‘rganish ilmiy va amaliy ahamiyatga ega hisoblanadi.

Kremniya ferromagnit xususiyatini olish uchun yuqoridagi boblarda o'rganilgandek yevropiy kirishma atom tanlab olindi. Boshlang'ich material sifatida parametrlari solishtirma qarshiligi $77\div 80 \Omega \cdot \text{sm}$ va fosfor konsentratsiyasi $N=7.25 \cdot 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ (kristal sirt orientatsiyasi (111)) bo'lgan n-turli kremniy Si<P>-80 asosida namunalar olingan. Diffuziya texnologiyasi doimiy manbaning gaz fazasidan amalga oshirildi.

Yevropiy kirishma atomi bilan legirlangan kremniydagi tok tashuvchilarning konsentratsiyasi va harakatchanlini haroratga bog'liqligi ECOPIA HALL HMS-7000 rusumli qurilmada azot haroratidan boshlab ($T=77 \text{ K}$) o'rganib chiqildi. Ko'p namunalarda takroriy o'lchovlar bir xil natijalarni berdi.



1-rasm. Yevropiy kirishma atomlari kiritilgan kremniya tok tashuvchilarning harakatchanligini haroratga bog'liqligi

O'rganilayotgan namunadagi o'lchash natijalaridan ko'rishimiz mumkinki haroratni oshishi, ya'ni kT energiyani oshirish bilan kristall panjara tugundagi atomlarining tebranishlarini amplitudasi ortishi oqibatida kristall panjara doimiysi o'zgaradi, kuzatilgan tebranish mexanizimi zaryad tashuvchilarni sochilishi deb ataladi [3]. Olingan natijalarga nazariy jihatdan qaraydigan bo'lsak, elektronlar va kovaklarning harakatchanligi $\mu_p \sim \mu_n \sim T^{\pm 3/2}$ ifodaga to'g'ri proporsional bo'ladi. Adabiyotlarda o'rganilgan yarimo'tkazgich elementlarining harorat $T=0-100 \text{ K}$ oraliqda harakatchanlik $T^{3/2}$ qonuniyat bo'yicha o'zgaradi. Harorat $T=100 \text{ K}$ dan oshganda $T^{-3/2}$ qonuniyat bo'yicha kamayadi. Tajribada o'rganilgan namunasida zaryad tashuvchilarning harakatchanligi $T^{-3/2}$ qonuniyat bo'yicha kamayib bordi. 2 rasmdagi grafikda $T^{3/2}$ qonuniyat kuzatilmadi, buning asosiy sabablari qurilmaning o'lchash chegarasini $T=77 \text{ K}$ haroratgachaligi hamda azot suyuqligining kimyoviy tozaligiga bog'liq bo'lishidir.

[3.] Ishlar aytib o'tilgan EuO birikmasi istiqbolli ferromagnit yarimo'tkazgich material hisoblanadi. Bu birikmaning kristall tuzulishi tosh tuzi kristall panjara tuzulishiga ega. [4-7] ishlardan Si<EuO> klaster bo'lganini ilmiy asoslangandan keyin namunaning magnit xususiyatini o'rganish uchun Istanbul texnika universiteti laboratoriyasida mavjud "Quantum Design MPMS-3 SQUID VSM" markali magnetometr qurilmasi yordamida bir necha bor xona haroratida o'rganildi.

Olish texnologiyasi. Tadqiqotni asosiy maqsadi kremniy sirtida yuqori klasterni hosil qilib uning katta magnit momentga ega materialni tatbiq etishdan iborat. Yevropiy atomlarining nanoklasterlarining turli konsentratsiyasi bo'lgan kremniy magnitlanishining magnit maydonga bog'liqligi o'rganildi 1-rasm. Shu sabab klasterlarni hosil bo'lish uchun yuqori ikki xil haroratda $T_1=1200^\circ\text{C}$, $T_2=1250^\circ\text{C}$ diffuziya qilib, magnit xususiyatini o'rganildi. Tadqiqot natijasidan ma'lumki, harorat yuqori qilishdan asosiy maqsad kremniy

sirtidagi konsentratsiyasini oshirishdan iborat. Namunalarning magnitlanishi 1-jadvalda tahlili keltirib o'tilgan.

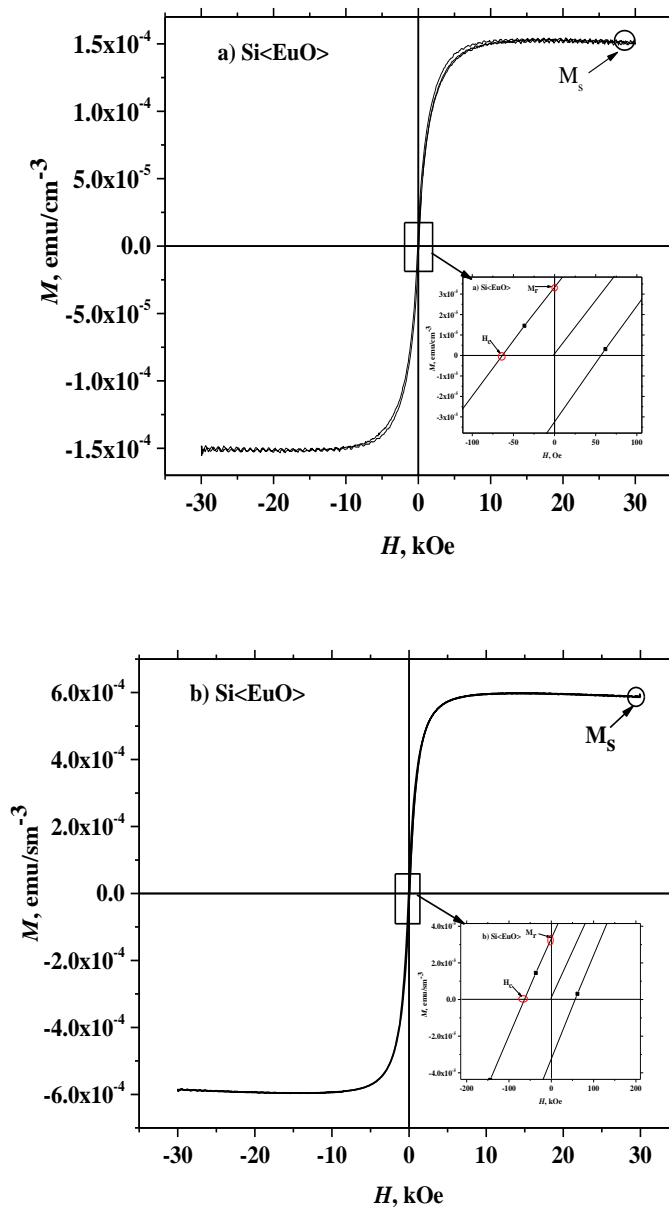
1-jadval.

Namunalarning magnitlanishi tahlili

Namunalar	Konsentratsiya N, sm^{-3}	Magnitlanishning to'yinganligi $M_s, \text{emu/sm}^{-3}$	Magnitlanish qoldig'i $M_r, \text{emu/sm}^{-3}$	Majburiy kuch H_c, Oe
<i>a</i>	$8.2 \cdot 10^{17}$	$\pm 1.47 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-5}$	58
<i>b</i>	$1.8 \cdot 10^{18}$	$\pm 5.95 \cdot 10^{-4}$	$3.42 \cdot 10^{-5}$	65.3

Tadqiqot natijasidan ko'rishimiz mumkinki xona haroratida o'rganilyotgan namunada magnitlanish Gisterezis hodisasi kuzatildi.

Agarda magnitlanganlikni (χ) quydagi 1 formula orqali hisoblab chiqsak xona haroratida $\chi=10^{-5}$ ga teng bo'ldi.



2-rasm. Turli haroratlarda yevropiy kirishma atomlarini diffuziya qilingan kremniy namunalarning magnitlanganligini tashqi magnet maydonga bog'liqligi; a-harorat $T_1=1200^\circ\text{C}$, b-harorat $T_2=1250^\circ\text{C}$.

$$\chi = \frac{M}{H}$$

bunda M –magnitlanish, H –magnit maydon kuchi

Yevropiy kirishma atomlari diffuzion usul bilan kiritilgan kremniyning magnit xususiyatlarini o‘rganish asosida tezkor ishlaydigan magnit sensorlar, magnit diodlar, tranzistorlar, integral sxemalar hamda sezgirligi yuqori magnit datchiklarni yaratish imkoniyatlari ko‘rsatilgan.

Xulosa. Xona haroratda ($T=300$ K) yevropiy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniy sirtida magnit domenlarni shakllantrishni yangi texnologiyasini yaratildi hamda tashqi magnit maydon ta’sirda tartibli oshishi kuzatildi. Si<EuO> namunalardagi magnitlanganlikni (χ) xona haroratida $\chi=10^{-5}$ ga teng ekanligi aniqlandi.

ADABIYOTLAR:

1. Ohno H., *Making Nonmagnetic Semiconductors Ferromagnetic. Control and use of defects in materials*//1998. Vol 281 No5379. pp 951–956. doi:10.1126/science.281.5379.951.

2. Zikrillaev N.F., Mavlonov G.H., Trabzon L., Isamov S.B., Abduganiev Y.A., Ibodullaev Sh.N., Kushiev G.A. *Magnetic Properties of Silicon Doped with Impurity Atoms of Europium* // *Journal of Nano and Electronic Physics*. 2023. Vol. 15 No 6, 06001.pp 1-4. ISSN: 2077-6772 IF: 0.716. [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(6\).06001](https://doi.org/10.21272/jnep.15(6).06001)

3. Бахадырханов М. К., Якубов А. А. *Энциклопедический справочник по полупроводниковым материалам: ТашГТУ*// 2010. 204 с.

4. Lahtinen T.H.E.; Tuomi J.O.; Van Dijken S. *Electrical Writing of Magnetic Domain Patterns in Ferromagnetic.Ferroelectric Heterostructures. IEEE transactions on magnetics* // 2011. Vol 47(10), Pp 3768–3771. doi:10.1109/tmag.2011.2143393.

5. Tagantsev A K.; Cross L E; Fousek J. *Domains in Ferroic Crystals and Thin Films. Springer Science+Business*//2010. pp 1-821. doi:10.1007/978-1-4419-1417-0.

6. Mavlonov G.H., Isamov S.B., Koveshnikov S.V., Zikrillaev Kh.F., Abduganiev Y. A., Sattorov A.A., Ibrohimov A.B. *Ordering of europium magnetic domains in silicon at room temperature* // *Indian Journal of Physics*. 2024. Vol 99(7) pp 2429–2435. ISSN:0973-1458 <https://doi.org/10.1007/s12648-024-03473-0>.

7. Мавлонов Г.Х., Абдуганиев Й.А. *Исследование электронного парамагнитного резонанса редкоземельных элементов (Nd, Eu, Gd), легированных в монокристаллическом кремнии* // *Вухоро давлат университети ilmiy axboroti*, 2024. 88-91 б.

8. Mavlonov G‘.H., Abdug‘aniyev Y.A. *Yevropiy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning magnit xususiyati* // *Buxoro davlat universiteti ilmiy axboroti*. №3. 2025. 96-100 б.

ERKIN TEBRANISHLAR TUSHUNCHASI VA FIZIK MOHIYATI

Ro'ziyev To'lqin Razzoqovich,

Buxoro davlat pedagogika instituti

Fizika kafedrasi dotsenti, f.-m.f.f.d. (PhD)

ruzievtulqin@gmail.com

Axmedova Umeda Farhod qizi,

Buxoro davlat pedagogika instituti 2-bosqich magistranti

umidaaxmedova661@gmail.com

Annotatsiya. Mazkur maqolada erkin tebranishlar tushunchasi, ularning fizik mohiyati, matematik ifodasi hamda turli tizimlarda ro'y berish sabablari keng yoritilgan. Shuningdek, tebranish jarayonining asosiy parametrlari amplituda, davr, chastota va fazaning o'zaro bog'lanishi tahlil qilinadi. Erkin tebranishlarning mexanik, elektr va akustik tizimlardagi namoyon bo'lishi nazariy asosda ko'rib chiqilib, ularning differensial tenglamalar orqali modellashtirilishi amaliy misollar bilan ko'rsatilgan.

Kalit so'zlar: erkin tebranishlar, mexanik tizim, differensial tenglama, burchak chastota, amplitude, faza burchagi, rezonans, energiya saqlanishi, LC-kontur, elastik kuch, Guk qonuni, Nyuton qonuni, tebranish nazariyasi, barqarorlik tahlili.

КОНЦЕПЦИЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ СУТЬ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Аннотация. В статье дан комплексный обзор понятия свободных колебаний, их физической природы, математического выражения и причин возникновения в различных системах. Проанализирована взаимосвязь между основными параметрами колебательного процесса: амплитудой, периодом, частотой и фазой. Теоретически рассмотрено проявление свободных колебаний в механических, электрических и акустических системах, а также на практических примерах показано их моделирование дифференциальными уравнениями.

Ключевые слова: свободные колебания, механическая система, дифференциальное уравнение, круговая частота, амплитуда, фазовый угол, резонанс, закон сохранения энергии, LC-контур, сила упругости, закон Гука, закон Ньютона, теория колебаний, анализ устойчивости.

THE CONCEPT AND PHYSICAL ESSENCE OF FREE VIBRATIONS

Abstract. This article provides a comprehensive overview of the concept of free oscillations, their physical nature, mathematical expression, and the causes of their occurrence in various systems. The relationship between the main parameters of the oscillatory process—amplitude, period, frequency, and phase—are analyzed. The manifestation of free oscillations in mechanical, electrical, and acoustic systems is theoretically examined, and their modeling using differential equations is demonstrated using practical examples.

Keywords: free vibrations, mechanical system, differential equation, angular frequency, amplitude, phase angle, resonance, energy conservation, LC-circuit, elastic force, Hooke's law, Newton's law, vibration theory, stability analysis.

Kirish. Tebranishlar hodisasi tabiatda keng tarqalgan bo'lib, u mexanik, elektr, akustik, hatto kvant tizimlarida ham kuzatiladi. Har qanday tizim muvozanat holatidan chetlashtirilganda va unga tiklovchi kuch ta'sir qilganda, u ma'lum vaqt davomida muvozanat holati atrofida davriy harakatni amalga oshiradi. Ana shu jarayon tebranish deb ataladi. Agar bu tebranishlar tashqi kuchlarning aralashuvisiz, faqat tizimning ichki energiyasi hisobiga yuzaga kelsa, u holda bu erkin tebranish deyiladi.

Erkin tebranishlar bu energiyaning bir shakldan ikkinchi shaklga uzluksiz almashinuvi bilan kechadigan murakkab dinamik jarayondir. Masalan, buloqqa osilgan yuk tebranganda, dastlabki potensial energiya kinetik energiyaga, so'ng yana potensial energiyaga aylanishda davom etadi. Shu kabi tebranishlar elektr konturlarida (induktivlik va sig'im orasida zaryad almashinuvi), akustik tizimlarda (tovush to'lqinlari shaklida), va hatto atom hamda molekullar darajasida ham kuzatiladi.

Erkin tebranishlarning mohiyatini chuqur anglash mexanika, qurilish, akustika, elektrodinamika, avtomatika va hatto nanofizika kabi ko‘plab sohalarda alohida ahamiyatga ega. Chunki real tizimlarning barqarorligi, chidamliligi va rezonans holatlarida yuzaga keladigan xavfli tebranishlarni aniqlash, ulardan himoyalash va ularni boshqarish imkoniyati aynan shu nazariy asosga tayanadi. Masalan, bino konstruksiyalarida, ko‘priklarda yoki mashina detallarida paydo bo‘ladigan erkin tebranishlarni hisobga olmaslik rezonans hodisasiga olib kelib, jiddiy mexanik shikastlanishlar keltirib chiqarishi mumkin.

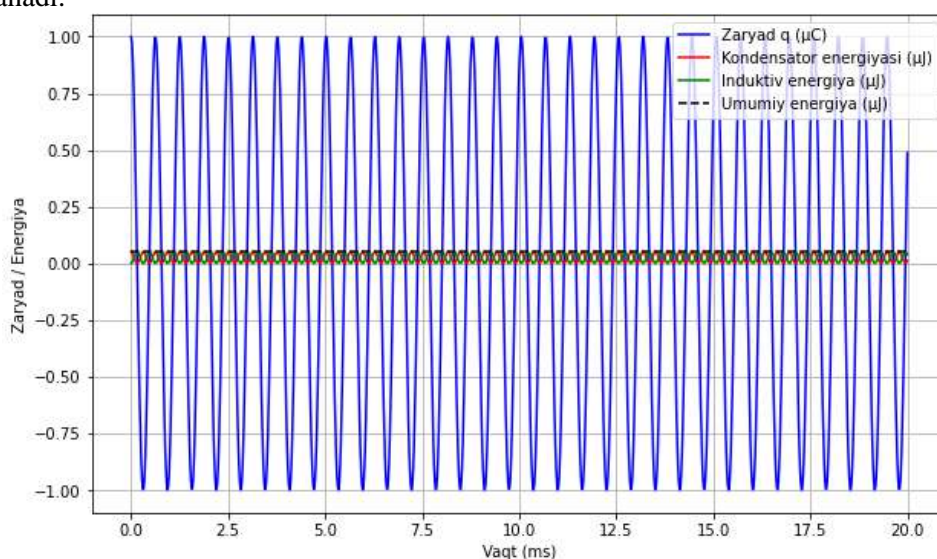
Shu bois erkin tebranishlar nazariyasini o‘rganish, ularning differensial tenglamalar orqali ifodalanishi va asosiy parametrlarini (amplituda, chastota, faza, davr) tahlil qilish bugungi kunda ilm-fan va muhandislik amaliyotida muhim ahamiyat kasb etadi. Ushbu tadqiqot natijalari turli tizimlarning dinamik xatti-harakatini prognoz qilish, rezonansni oldini olish hamda energiya tejamkor boshqaruv usullarini ishlab chiqishda keng qo‘llaniladi.

Adabiyotlar tahlili. Erkin tebranishlar nazariyasi asrlar davomida ko‘plab olimlar tomonidan chuqur o‘rganilgan va rivojlantirilgan. Bu sohadagi tadqiqotlar mexanik tizimlardan boshlanib, keyinchalik elektr va boshqa fizik tizimlarga kengaytirilgan. A. Lagrange, I. Nyuton va D. Bernulli mexanik tebranishlarni matematik jihatdan tavsiflashga asos solgan olimlardir. Ular differensial tenglamalar yordamida tizimning harakatini ifodalash va energiya almashinuvi prinsiplarini tushuntirishga kirishgan, bu esa massalar, buloqlar va pendullar kabi klassik tizimlarda erkin tebranishlarni matematik modellashtirishga imkon yaratgan. Keyinchalik, Lord Rayleigh tebranishlar energiyasi, amplituda, davr va rezonans hodisalarini chuqur tahlil qilgan, tebranishlarning tabiiy chastotalari, tizimning tashqi kuchlarga javobi va energiya saqlanishini o‘rganish orqali nazariyani yangi bosqichga olib chiqqan va rezonans hodisasining xavfsizlik hamda muhandislik ilovalaridagi ahamiyatini aniqlagan. So‘nggi asrlarda zamonaviy olimlar erkin tebranishlarni kengroq tizimlarda o‘rganishga e‘tibor qaratgan; struktura tahlilida binolar, ko‘priklar va mashinalar elementlarining tabiiy tebranish chastotalari, amplitudasi va energiya almashinuvi o‘rganiladi, elektr tizimlarda esa RLC zanjirlari orqali zaryad va tokning almashinuvi mexanik tebranishlarning analogi sifatida tahlil qilinadi. Zamonaviy tadqiqotlar erkin tebranishlarni matematik modellashtirish va kompyuter simulyatsiyalari yordamida batafsil o‘rganishga yo‘naltirilgan bo‘lib, turli chegaraviy shartlar va tashqi ta’sirlar ostida tizimlarning javobi oldindan bashorat qilinadi. Shu tariqa, adabiyotlar tahlili erkin tebranishlarni tushunishda tarixiy asoslar, matematik modellashtirish, energiya almashinuvi va zamonaviy tadqiqotlarning bir-biriga bog‘liqligini ko‘rsatadi, bu esa nafaqat nazariy, balki amaliy muhandislik masalalarini yechishda ham muhim ahamiyatga ega.

Zamonaviy adabiyotlarda (masalan, Landau va Lifshits “Mexanika” asarida) erkin tebranishlar umumiy differensial tenglamalar bilan tavsiflanadi. Elektr tizimlaridagi erkin tebranishlar esa LC -kontur modeli orqali ifodalanadi (1-rasm):

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{1}{C} q = 0 \quad (1)$$

Bu yerda L - induktivlik, C - sig‘im, q - zaryad. Ushbu tenglama mexanik tebranish tenglamasiga to‘liq analog hisoblanadi.



1-rasm. RLC zanjirida erkin tebranish va energiya almashinuvi

Adabiyotlarda qayd etilishicha, erkin tebranish tizimlarida energiyaning saqlanish qonuni asosiy rol oʻynaydi. Tizimga tashqi energiya taʼsir qilinmasa, uning umumiy energiyasi doimiy qoladi.

Boshlangʻich nuqtada tizimning energiyasi turli shakllarda boʻlishi mumkin: baʼzan u toʻliq potensial energiya shaklida, baʼzan esa toʻliq kinetik energiya shaklida boʻladi. Harakat davomida bu energiyalar oʻzaro almashadi: potensial energiya kinetik energiyaga aylanadi, kinetik energiya esa yana potensial energiyaga. Shu tarzda energiya doimiy ravishda tizim ichida aylanishi natijasida erkin tebranishlar davom etadi.

Bu jarayon mexanik, elektr va boshqa turdagi tizimlarda bir xil prinsipda ishlaydi va tizimning har bir vaqtdagi holatini, tezligini va harakat xususiyatlarini aniqlashda muhim ahamiyatga ega:

$$E = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = const \quad (2)$$

Tadqiqot metodologiyasi. Ushbu tadqiqot erkin tebranishlarning fizik mohiyatini, ularni matematik modellashtirish usullarini va vaqt boʻyicha oʻzgarishlarini batafsil tahlil qiladi.

Erkin tebranishlar bu tizim tashqi taʼsirlarisiz tabiiy ravishda harakatlanadigan holatlar. Masalan, elastik jismlar, pendullar yoki massali-spring tizimlar oʻzining ichki energiyasi yordamida harakat qiladi. Tizimga tashqi kuchlar taʼsir qilinmasa, bu harakatlar davom etadi.

Erkin tebranishlarni matematik jihatdan tavsiflash uchun differensial tenglamalar ishlatiladi. Ularning yordamida tizimning asosiy xususiyatlari aniqlanadi:

Davr (T) - tebranishning bir toʻliq sikli uchun ketadigan vaqt.

Chastota (f) - bir vaqt birligida qancha tebranish amalga oshishini bildiradi.

Amplituda (A) - tebranishning maksimal qiymati yoki eng katta siljish hajmi.

Fazaviy burchak - tebranish boshlanish nuqtasi va boshlangʻich holatini belgilaydi.

Bu parametrlar bir-biri bilan chambarchas bogʻliq boʻlib, tizimning har bir vaqtdagi holatini, tezligini va harakat yoʻnalishini aniqlash imkonini beradi.

Tadqiqot davomida erkin tebranishlarning matematik modellashtirilishi turli tizimlar uchun qoʻllaniladi. Bu mexanik tizimlar, struktura tahlillari va muhandislik ilovalarida tebranishlarning oldindan bashorat qilinishini taʼminlaydi.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ va } f = \frac{1}{T}, \quad (3)$$

bu yerda T - tebranish davri (s), f - chastota (Hz), ω - burchak chastota (rad/s).

Grafik jihatdan erkin tebranishlar sinusoidal shaklda ifodalangani. Bu chiziqli grafik tebranish jarayonining davriy va muvozanat holati atrofida takrorlanib turuvchi xarakterini aniq koʻrsatadi. Sinusoidal shakl tizimning energiya almashinuvi jarayonini - yaʼni kinetik va potensial energiyalarning oʻzaro aylanishini - tasvirlaydi.

Tajriba va modellashtirish natijalari shuni koʻrsatadiki, agar tizimda ishqalanish yoki qarshilik kuchlari mavjud boʻlsa, tebranishlar vaqt oʻtishi bilan susayadi. Bunday holatlarda erkin tebranishning matematik ifodasi soʻnuvchi eksponenta koʻrinishida yoziladi:

$$x(t) = Ae^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

bu yerda β - soʻnish (susayish) koeffitsiyenti boʻlib, u tizimdagi energiya yoʻqotish darajasini belgilaydi.

Metodologik jihatdan, tadqiqot ikki asosiy bosqichda olib borildi:

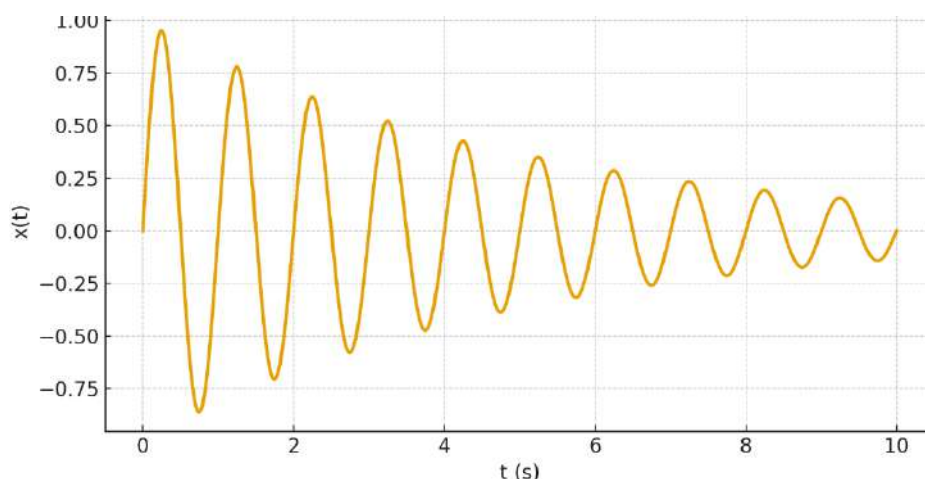
1. Nazariy modellashtirish – erkin tebranish tenglamalari asosida parametrlar oʻrtasidagi bogʻlanish aniqlanib, tebranish jarayonining matematik modeli tuzildi.

2. Grafik tahlil – sinusoidal va susayuvchi tebranishlarning vaqt boʻyicha oʻzgarish grafigi qurilib, ularning amplituda va chastota xususiyatlari solishtirildi (2-rasm).

Ushbu metodologiya tebranish jarayonini chuqur tahlil qilish, tizimdagi energiya almashinuvi va soʻnish tezligini aniqlash, shuningdek, rezonans holatlarida barqarorlik sharoitlarini baholash imkonini beradi.

Fizik mohiyat. Erkin tebranishlarning fizik mohiyati shundan iboratki, ular tizim ichidagi energiya muvozanati asosida yuzaga keladi. Boshqacha aytganda, tizim tashqi taʼsirsiz oʻz ichki energiyasidan foydalangan holda tabiiy ravishda harakatlanadi. Bu jarayonda energiya bir turdan boshqasiga uzluksiz oʻtadi va doimiy almashinuv sodir boʻladi.

Masalan, mexanik tizimlarda, erkin tebranishlarni buloq va massa orqali tasavvur qilish mumkin. Buloq siqilganda yoki choʻzilganda uning potensial energiyasi maksimal boʻladi, bu energiya massaning harakati boshlanishi bilan kinetik energiyaga aylanadi. Massaning harakati toʻxtaganda, kinetik energiya yana buloqning potensial energiyasiga aylanadi. Shu tarzda energiya doimiy ravishda bir turdan boshqasiga oʻtadi, natijada tizimda erkin tebranishlar davom etadi.

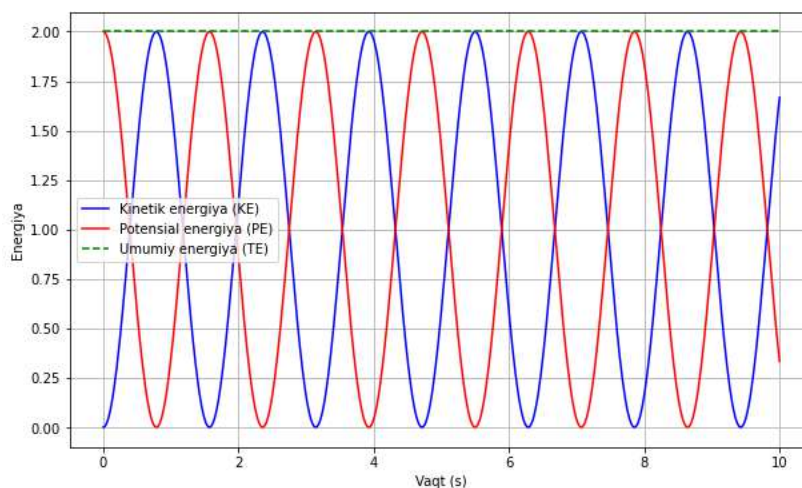


2-rasm. Susayuvchi sinusoidal tebranish grafigi

Shunga o‘xshash jarayon elektr tizimlarda ham kuzatiladi. Masalan, RLC zanjirida kondensator va induktivlik energiyasi o‘rtasida almashuv sodir bo‘ladi. Kondensator zaryadi maksimal bo‘lgan paytda uning energiyasi eng yuqori bo‘ladi, tok esa nolga teng bo‘ladi. Tok maksimal bo‘lganda, kondensator zaryadi nolga tushadi va uning energiyasi induktivlik energiyasiga aylanadi. Shu bilan elektr energiyasi ham mexanik tizimdagi kabi bir turdan boshqasiga uzluksiz almashadi.

Shunday qilib, erkin tebranishlar — bu energiyaning bir turdan boshqasiga o‘tib, tizim ichida qayta tiklanib turish jarayoni bo‘lib, u nafaqat mexanik, balki elektr va boshqa fizik tizimlarda ham bir xil prinsipda amalga oshadi. Bu tushuncha erkin tebranishlarni chuqur tahlil qilish, ularning davriyligi, amplitudasi va fazaviy holatini aniqlashda asosiy rol o‘ynaydi.

Shunday qilib, tebranishlar - bu energiyaning bir turdan boshqasiga o‘tib, qayta tiklanib turish jarayonidir (3-rasm).



3-rasm. Erkin tebranishlarning fizik mohiyati

Natijalar va ularning muhokamasi. O‘tkazilgan tahlillar natijasida susayuvchi sinusoidal tebranish grafigi vaqt o‘tishi bilan amplitudaning eksponentsial kamayishini aniq ko‘rsatdi. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, tebranish dastlab yuqori energiyaga ega bo‘lib, vaqt o‘tishi bilan asta-sekin so‘nadi. Bu jarayon tizimdagi ishqalanish, qarshilik yoki energiya yo‘qotish holatlari bilan izohlanadi. Dastlabki bosqichda amplituda maksimal qiymatga ega bo‘ladi, biroq har bir davrda u β koeffitsientga bog‘liq holda kamayib boradi. Egri chiziq ustidagi qizil punktir konvertlar - $\pm A e^{-\beta t}$ - tebranish amplitudasining chegaraviy qiymatlarini ko‘rsatadi. Ular orasida joylashgan sinusoidal egri chiziq esa tebranishning davriy xarakterini aks ettiradi. Har bir davrda amplituda kamaygani sari tizimning kinetik energiyasi potensial energiyaga nisbatan qisqaradi, natijada umumiy mexanik energiya ham pasayadi. Bu holat energiyaning so‘nuvchi almashinuvi sifatida talqin qilinadi. Susayuvchi tebranishlarning muhim xususiyati shundaki, ular vaqt o‘tishi bilan muvozanat holatiga intiladi. So‘nish tezligi β koeffitsiyent orqali belgilanib, tizimning fizik xususiyatlariga (masalan, ishqalanish kuchi, o‘tkazuvchanlik, qarshilik) bevosita bog‘liqdir. β qiymati ortgan

sari tebranish tezroq soʻnadi, yaʼni tizim barqaror holatga tezroq qaytadi. Aksincha, β juda kichik boʻlsa, tebranish uzoq davom etadi - bu holat amaliy tizimlarda rezonansga yaqin xatti-harakatlarni keltirib chiqarishi mumkin. Olingan natijalar mexanik va elektr tizimlarning dinamik javobini tahlil qilishda muhim ahamiyatga ega. Masalan, buloq-yuk tizimi, LC-kontur, yoki akustik rezonatorlarda tebranish energiyasining soʻnish tezligini baholash, barqarorlikni saqlash hamda rezonansni oldini olish aynan shu matematik model orqali amalga oshiriladi. Shu tarzda olingan tahliliy natijalar amaliy konstruksiyalarni loyihalashda energiya yoʻqotishlarni minimallashtirish va tizimning xizmat muddatini uzaytirishga xizmat qiladi.

Xulosa. Tadqiqot natijalari shuni koʻrsatadiki, erkin tebranishlar har qanday fizik tizimning asosiy dinamik xususiyatlaridan biri boʻlib, u energiyaning bir shakldan boshqasiga uzluksiz almashinuvi jarayonida kechadi. Tebranishlar matematik jihatdan sinusoidal shaklda ifodalanadi va ularning asosiy parametrlari - amplituda, davr, chastota hamda faza - oʻzaro muvofiq bogʻlangan miqdorlar hisoblanadi.

Ishqalanish yoki tashqi qarshilik mavjud boʻlgan holatlarda tebranishlar soʻnuvchi xarakterga ega boʻladi. (4)- tenglama koʻrinishidagi funksiya yordamida bu jarayon aniqlik bilan tavsiflanadi. Grafik tahlil shuni koʻrsatadiki, amplituda vaqt oʻtishi bilan eksponentsial kamayadi, bu esa tizimdagi energiya yoʻqotish darajasini ifodalaydi.

β koeffitsiyentning qiymati tebranishning soʻnish tezligini belgilab, tizimning barqarorlik holatini aniqlashda muhim ahamiyatga ega. Katta β qiymati tez soʻnuvchi, kichik β qiymati esa uzoq davom etuvchi tebranishlarga olib keladi. Ushbu qonuniyatlar mexanik, elektr va akustik tizimlarni loyihalashda rezonansni oldini olish, barqarorlikni taʼminlash va energiya samaradorligini oshirish uchun amaliy asos yaratadi.

Umuman olganda, erkin tebranishlarning nazariy va grafik tahlili murakkab tizimlarning dinamik javobini tushunish, ularni modellashtirish va optimallashtirishda muhim ilmiy hamda amaliy ahamiyatga ega.

ADABIYOTLAR:

1. Landau L.D., Lifshits E.M. *Mexanika, Moskva: Nauka, 1976.*
2. Rayleigh J.W. *The Theory of Sound, London, 1896.*
3. Yakubov A.R. *Mexanik tebranishlar asoslari, Toshkent: Oʻqituvchi, 1998.*
4. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. *Differensial tenglamalar nazariyasi, Moskva, 1983.*
5. Feynman R. *Lectures on Physics, Vol. I, Addison-Wesley, 1964.*
6. Thomson W. *Theory of Vibrations, Cambridge University Press, 1887.*
7. Poincaré H. *Mécanique, Paris: Gauthier-Villars, 1892.*
8. Papaleksi Y. *Elastic Systems and Vibrations, Moscow: Nauka, 1970.*
9. Meirovitch L. *Elements of Vibration Analysis, New York: McGraw-Hill, 1975.*
10. Den Hartog J.P. *Mechanical Vibrations, London: McGraw-Hill, 1956.*
11. Clough R.W., Penzien J. *Dynamics of Structures, McGraw-Hill, 1975.*
12. Rao S.S. *Mechanical Vibrations, Pearson, 2004.*
13. Inman D.J. *Engineering Vibrations, Prentice Hall, 2001.*
14. Thomson W.T., Dahleh M.D. *Theory of Vibration with Applications, Prentice Hall, 1998.*
15. Graff K.F. *Wave Motion in Elastic Solids, Dover Publications, 197*

CaMoO₄ KRISTALLARIDA AKUSTIK TO‘LQINLARDA KOLLINEAR YORUG‘LIK DIFRAKSIYASI

Axmedjanov Farxad Rashidovich,

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti

“Ko‘p fazali tizimlar issiqlik fizikasi” laboratoriya mudiri

Boltabayev Azizbek Farxadovich,

Respublika radioaktiv chiqindilarni ko‘mish

punkti davlat unitar korxonasi direktori

Elboyeva Moxinur Imomnazar qizi

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi

Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti katta ilmiy xodimi

elboyevamoxinur1990@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu ishda kalsiy molibdati (CaMoO₄) kristallarida yorug‘likning ko‘ndalang akustik to‘lqinlarda kollinear Bragg diffraksiyasi o‘rganildi. Mustaqil fotoelastiklik tenzori komponentlari modifikatsiyalangan Dikson usuli yordamida aniqlanib, ular asosida samarali fotoelastik doimiysi hamda akustooptik sifat koeffitsienti M_2 ning turli geometriyali diffraksiyalari hisoblandi. Natijalarga ko‘ra, CaMoO₄ kristallarining ko‘ndalang to‘lqinlar uchun M_2 ning qiymati PbMoO₄ va LiNbO₃ kristallariga nisbatan yuqori ekanligi aniqlangan. Maksimal M_2 qiymati ($12.1 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$) 120° va 210° yo‘nalishlarda kuzatildi. Olingan natijalar CaMoO₄ kristallarining akustooptik filtr va modulyatorlarda samaradorligini oshirish imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: kalsiy molibdati, akustooptik effekt, Bragg diffraksiyasi, fotoelastiklik, kollinear diffraksiya.

КОЛЛИНЕАРНАЯ ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В КРИСТАЛЛАХ CaMoO₄

Аннотация. В работе исследована коллинеарная Брэгговская дифракция света на поперечных акустических волнах в кристаллах CaMoO₄. Независимые компоненты тензора фотоупругости были определены модифицированным методом Диксона. На их основе рассчитаны эффективная фотоупругая постоянная и акустооптический коэффициент качества M_2 для различных геометрий дифракции. Показано, что для поперечных волн значение M_2 в кристаллах CaMoO₄ значительно выше, чем у PbMoO₄ и LiNbO₃. Максимум M_2 ($12.1 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$) наблюдается при углах 120° и 210°. Эти результаты подтверждают, что CaMoO₄ является перспективным материалом для акустооптических фильтров и модуляторов.

Ключевые слова: молибдат кальция, акустооптический эффект, Брэгговская дифракция, фотоупругость, коллинеарная дифракция.

COLLINEAR DIFFRACTION OF LIGHT ON ACOUSTIC WAVES IN CaMoO₄ CRYSTALS

Abstract. The collinear Bragg diffraction of light by transverse acoustic waves in calcium molybdate (CaMoO₄) crystals has been investigated. Independent components of the photoelastic tensor were determined using the modified Dixon method. Based on these values, the effective photoelastic constant and the acousto-optic figure of merit (M_2) were calculated for different diffraction geometries. It was shown that for transverse waves M_2 value in CaMoO₄ crystals is a significantly higher compared to PbMoO₄ and LiNbO₃. The maximum M_2 ($12.1 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$) is observed at 120° and 210°. These results confirm that CaMoO₄ is a promising material for acousto-optic filters and modulators.

Key words: calcium molybdate, acousto-optic effect, Bragg diffraction, photoelasticity, collinear diffraction.

Kirish. Kalsiy molibdati (CaMoO₄) sheyelit turkumiga mansub tetragonal tuzilishga ega bo‘lib, yuqori optik shaffoflik, past akustik so‘nuvchanlik, mexanik barqarorlik va ekologik xavfsizlik bilan ajralib turadi

[1–4]. Bu xususiyatlar uni akustooptik qurilmalar filtrlash, modulyatsiya, lazer chastota stabilizatsiyasi va spektral analizatorlar uchun muhim funksional materialga aylantiradi [5-6].

Akustooptik effekt fotoelastiklik hodisasi bilan bog‘liq bo‘lib, elastik to‘lqinlar tomonidan keltirilgan davriy sinish ko‘rsatkichi modulyatsiyasi natijasida yorug‘likning difraksiyanishiga olib keladi. Kollinear Bragg difraksiyasi holatida optik va akustik to‘lqinlar bir yo‘nalishda tarqaladi, bu faza sinxronizatsiyasining eng qulay sharoitini yaratadi [7-8]. Ushbu jarayonning samaradorligi fotoelastiklik tenzori komponentlari, akustik to‘lqin tezligi, zichlik va optik sindirish ko‘rsatkichiga bog‘liq bo‘lib, ular M_2 akustooptik sifat koeffitsienti orqali baholanadi [9-10].

Avvalgi ishlar CaMoO_4 kristalining yuqori fotoelastik xususiyatlarga ega ekanligini ko‘rsatgan bo‘lsa-da, ayniqsa *ko‘ndalang* akustik to‘lqinlar uchun *kollinear difraksiyaning* burchakka bog‘liqligi hali yetarlicha o‘rganilmagan [3, 11]. Shu bois ushbu tadqiqot CaMoO_4 kristallarining kollinear Bragg difraksiyasi mexanizmlarini chuqur tahlil qilishga, samarali fotoelastik konstantalar va M_2 koeffitsientining burchakka bog‘liqligini aniqlashga qaratilgan. Taqqoslash uchun keng qo‘llaniladigan PbMoO_4 va LiNbO_3 kristallari ham tekshirildi [12–15].

Tadqiqot metodologiyasi. Tajribalarda He–Ne lazer ($\lambda=632.8$ nm) nuri yordamida yorug‘likning akustik to‘lqinlarga Bragg difraksiyasi kuzatildi. Akustik to‘lqinlar kvarts transduserlar orqali 10–30 MHz chastotalarda qo‘zg‘atildi. Effektiv fotoelastik konstantalar modifikatsiyalangan Dikson usuli bilan aniqlanib, quyidagi ifoda asosida hisoblandi [4]:

$$p_{\text{eff}} = \frac{n^3 V}{2\rho\lambda} \sqrt{\frac{I_X}{I_S}} \quad (1)$$

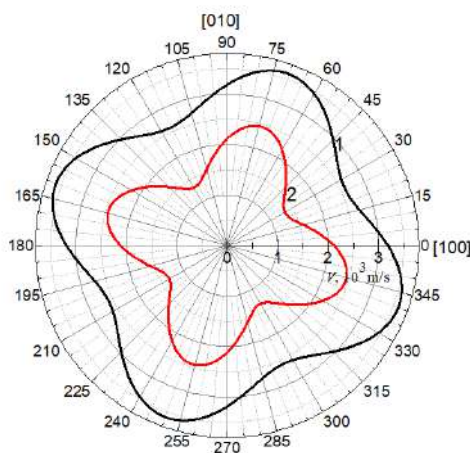
bu yerda n – sinish ko‘rsatkichi, V – akustik to‘lqin tezligi, ρ – zichlik, I_X va I_S tadqiqot namunasi va etalon uchun difraksiyon intensivliklardir.

Olingan tezliklar va p_{eff} qiymatlaridan foydalanib, akustooptik sifat koeffitsienti quyidagi formula orqali topildi [5]:

$$M_2 = \frac{n^6 p_{\text{eff}}^2}{\rho V^3} \quad (2)$$

Ushbu metodologiya orqali CaMoO_4 , PbMoO_4 va LiNbO_3 kristallarining *ko‘ndalang* to‘lqinlar uchun akustooptik xossalari aniqlandi.

Natijalar va muhokama. Kristallarda akustik to‘lqinlarning faza tezligi ularning elastik konstantalari va simmetriyasiga bog‘liq bo‘lib, anizotrop materiallarda bu tezlik to‘lqin vektorining yo‘nalishiga qarab sezilarli o‘zgaradi. CaMoO_4 va PbMoO_4 kabi tetragonal simmetriyaga ega kristallarda kvazi-ko‘ndalang to‘lqinlar uchun faza tezliklari Kristoffel tenglamalari asosida hisoblanadi va bu qiymatlar akustooptik samaradorlikka bevosita ta’sir ko‘rsatadi. Yo‘nalish bo‘yicha faza tezligining kamayishi M_2 koeffitsientining ortishiga olib keladi, chunki M_2 akustik tezlikning uchinchi darajasiga teskari proporsionaldir. (001) tekislikdagi CaMoO_4 va PbMoO_4 kristallarining kvazi-ko‘ndalang to‘lqinlar faza tezliklarining burchakka bog‘liqligi 1-rasmda keltirilgan.



1-rasm. CaMoO_4 (1) va PbMoO_4 (2) kristallarining (001) tekislikda kvazi-ko‘ndalang akustik to‘lqinlar faza tezligining akustik to‘lqin vektoriga bog‘liqligi

Grafik faza tezliklarining burchak bo‘yicha anizotropiligini yaqqol aks ettiradi. Har ikki kristalda faza tezligi yo‘nalish o‘zgarishi bilan sezilarli darajada farq qiladi, biroq CaMoO_4 kristalida bu o‘zgarish nisbatan barqaror va silliq xarakterga ega. PbMoO_4 kristalida esa elastik modullarning og‘ir metall komponentlari

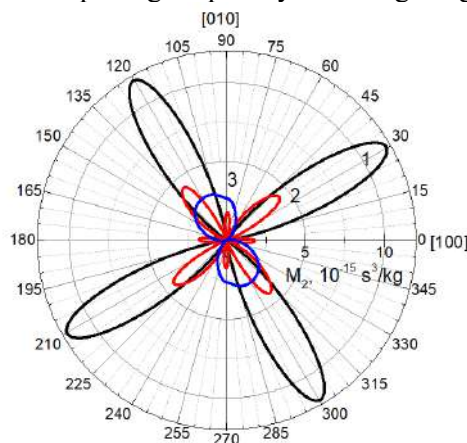
sababli faza tezligining burchakka sezgirliги kuchliroq. Grafikdan ko‘rinadiki, CaMoO₄ kristali ko‘plab yo‘nalishlarda PbMoO₄ ga nisbatan yuqori faza tezligiga ega bo‘lib, bu akustooptik jarayonda qulay dinamik sharoitlarni yaratadi. Faza tezligining burchakka bog‘liq bu farqlari M₂ koeffitsientining maksimal qiymatlarining ham aynan ma‘lum yo‘nalishlarda (120° va 210°) kuzatilishiga sabab bo‘ladi. Zero, faza tezligi qanchalik past bo‘lsa, akustooptik o‘zaro ta‘sir uchun shunchalik qulay bo‘ladi, chunki M₂ koeffitsienti tezlikning uchinchi darajasiga teskari proporsional. Shu bois CaMoO₄ ning (001) tekislikdagi faza tezliklari taqsimoti materialning yuqori akustooptik samaradorligini tushuntiruvchi asosiy fizik omillardan biridir. 1- jadval uchta material orasida to‘liq va kompleks taqqoslash imkonini beradi.

1-jadval.

Kristallarning akustooptik parametrlari

Kristall	N	ρ (kg/m ³)	V (m/s)	p _{eff}	M _{2,max} (×10 ⁻¹⁵ s ³ /kg)
CaMoO₄ (CMO)	1.98	4250	2850	0.17	12.12
PbMoO₄ (PMO)	2.20	6950	2700	0.12	4.43
LiNbO₃	2.23	4650	3700	0.10	3.07

Jadvalda CaMoO₄, PbMoO₄ va LiNbO₃ kristallarining asosiy akustooptik parametrlarining taqqoslanishi keltirilgan bo‘lib, ular materiallarning difraksion samaradorligini aniqlovchi asosiy omillardan hisoblanadi. CaMoO₄ kristalining nisbatan past sindirish ko‘rsatkichi (n = 1.98) va ayniqsa past zichligi (ρ = 4250 kg/m³) uning akustooptik samaradorligini oshiradi, chunki M₂ koeffitsienti zichlik va akustik tezlikning kubiga teskari proporsionaldir. CaMoO₄ ning ko‘ndalang akustik to‘liq tezligi (V=2850 m/s) ham boshqa kristallarga nisbatan past bo‘lib, bu M₂ ning ortishiga yana bir omil bo‘ladi. Eng muhim parametr samarali fotoelastik konstantaning (p_{eff} = 0.17) PbMoO₄ va LiNbO₃ ga qaraganda yuqori bo‘lishi CaMoO₄ ning optik modulyatsiyaga javob berish xususiyatini kuchaytiradi. Tahlil shuni ko‘rsatadiki, CaMoO₄ akustooptik qurilmalar uchun eng qulay parametrlar kombinatsiyasiga ega materialdir. Bu jadval akustooptik modulyatorlar, filtrlash tizimlari, spektral analizatorlar va lazerlar uchun material tanlashda asosiy ilmiy manba sifatida xizmat qilishi mumkin. CaMoO₄, PbMoO₄ va LiNbO₃ kristallarida akustooptik sifat koeffitsientining (001) tekislikda akustik to‘liqning tarqalish yo‘nalishiga bog‘liqligi 2-rasmda keltirilgan.



2-rasm. CaMoO₄ (1), PbMoO₄ (2) va LiNbO₃ (3) kristallarida M₂ koeffitsiyentining (001) tekislikda akustik to‘liqning tarqalish yo‘nalishiga bog‘liqligi

Grafikdan ko‘rinib turibdiki, M₂ ning qiymati CaMoO₄ kristali uchun 120° va 210° burchaklarda maksimumga ega bo‘lib, qiymat 12.1×10⁻¹⁵ s³/kg ga yetadi. Bu PbMoO₄ va LiNbO₃ kristallaridagi mos ravishda 4.4 va 3.1×10⁻¹⁵ s³/kg qiymatlardan mos ravishda 2.7 va 4 baravar yuqoridir. Bu yo‘nalishlarda optik-akustik faza uyg‘unlashuvi maksimal bo‘lib, kollinear Bragg difraksiyasi uchun optimal geometriya ta‘minlanadi. Bu natija CaMoO₄ kristallarining kollinear Bragg difraksiyasi sharoitida optik va akustik to‘liqlar energiya almashinuvi eng samarali yo‘nalishlarga ega ekanini ko‘rsatadi. Shuningdek, uning past zichligi (4250 kg/m³) tufayli energiya o‘tish samaradorligi yuqori bo‘ladi, bu esa akustooptik filtrlarda sezilarli afzallik beradi.

Xulosa. Ushbu tadqiqotda CaMoO_4 kristallarida ko'ndalang akustik to'lqinlar bilan yorug'likning kollinear Bragg difraksiyasi o'rganildi. Modifikatsiyalangan Dikson usuli yordamida fotoelastik tenzor komponentlari aniqlanib, samarali fotoelastik konstantalar va akustooptik sifat koeffitsiyenti M_2 hisoblandi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, CaMoO_4 kristallarida M_2 PbMoO_4 va LiNbO_3 ga nisbatan yuqori bo'lib, maksimal qiymat 120° va 210° yo'nalishlarda kuzatildi. Faza tezligining barqaror taqsimoti, past zichlik va yuqori fotoelastik konstantalar CaMoO_4 ning akustooptik jarayonlarda yuqori samaradorlik ko'rsatishiga imkon beradi. Shu bilan birga, u akustooptik modulyatorlar, filtrlash tizimlari va lazerlarda qo'llash uchun istiqbolli material sifatida ajralib turadi. Olingan natijalar kollinear Bragg difraksiyasi va akustooptik samaradorlik o'rtasidagi bog'liqlikni ilmiy jihatdan tasdiqlaydi.

ADABIYOTLAR:

1. Dixon R.W., Cohen M.G. *A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors...* *Appl. Phys. Lett.*, 1966.
2. Venturini E.L., Spencer E.G., Ballman A.A. *Elasto-optic properties of $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$...* *J. Appl. Phys.*, 1969.
3. Akhmedzhanov F.R., Elboeva M.I. *Collinear Diffraction of Light in CaMoO_4 Crystals*, 2024.
4. Yao X., Zhang W. *Acousto-optic properties of CaMoO_4 and PbMoO_4* , *Optical Materials*, 2020.
5. Yariv A. *Optical Electronics in Modern Communications*, OUP, 2019.
6. Boyd R.W. *Nonlinear Optics*, Academic Press, 2020.
7. Dmitriev V. et al. *Handbook of Nonlinear Optical Crystals*, Springer, 2021.
8. Smith J. et al. *Acousto-Optic Devices*, *J. Appl. Phys.*
9. Chang R. *Advanced Acousto-Optic Theory*, *Physics Reports*, 2018.
10. Kolbus R., et al. *Elastic Wave Propagation in Anisotropic Crystals*, *Optics Express*, 2017.
11. Müller M. *Sheelite-type Crystals for Modern Optics*, *Crystal Growth Reports*, 2022.
12. Lin S., et al. *Photoelastic characterization of tetragonal oxides*, *Optics Letters*, 2019.
13. Kuroda T. *Bragg diffraction in acousto-optic systems*, *JOSA B*, 2021.
14. Pavlov P. *Elastic and acoustic properties of Mo-based crystals*, *J. Crystal Phys.*, 2020.
15. Huang Y., et al. *Comparative acousto-optic study of LiNbO_3 and Mo-based crystals*, *Optical Engineering*, 2023.

URAN VA PLUTONIY IZOTOPLARINI BOYITILISHI VA ULARNI YADRO
REAKTORLARIDA QO'LLANILISHI**Eshbo'riyev Rashid,**

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti
Yadro texnologiyalari instituti Yadro fizikasi va
astronomiya kafedrası professori
eshburiyev0082@gmail.com

Ubaydullayeva Muhayyo Abdurasul qizi,

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti
Yadro texnologiyalari instituti Yadro fizikasi va
astronomiya kafedrası magistranti
ubaydullayevamuhayyo80@gmail.com

Fayzullayeva Mukarram Lutfullo qizi,

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti
Yadro texnologiyalari instituti Yadro fizikasi va
astronomiya kafedrası stajyor-tadqiqotchisi
mukarramfatzullayeva@gmail.com

Abdusamadova Dilfuza Iskandar qizi,

Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti
Yadro texnologiyalari instituti Yadro fizikasi va
astronomiya kafedrası magistranti
dilfuzaabdusamadova28@gmail.com

Annotatsiya. Mazkur ishda uran izotoplarini boyitilish usullari va texnologiyalari chuqur tahlil qilingan va bu usullarning bir-biridan ustunligi hamda aniqlik darajasi ko'rsatilgan. Uran-235 izotopini boyitishning ayniqsa gaz-diffuziya, lazer va kimyoviy usullari to'liq tahlil qilingan.

Shuningdek, uran-235 izotopini matematik tenglamalardan foydalanib boyitishning bir bosqichli usuli taklif etilgan, bu bo'yicha matematik tenglamalar sistemasi va uning yechimlari keltirilgan. Uran-235 izotopini boyitilishini matematik tenglamalar yordamida bir bosqichli usuli bilan hisoblangan qiymati boshqa usullar bilan olingan qiymatlariga mos kelishi ko'rsatildi.

Kalit so'zlar: ajratish koeffitsiyenti, atom reaktori, boyitilgan uran, gaz diffuziya, izotop almashinuv, izotop boyitish, izotop ajratish, kimyoviy usuli, lazer usuli, magnit maydoni, matematik modellash, matematik tenglama, massa balansi, neytron, tabiiy uran, uran izotoplari, uran-233, uran-235, uran-238, yadro yoqilg'isi.

ОБОГАЩЕНИЕ ИЗОТОПОВ УРАНА И ПЛУТОНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Аннотация. В данной работе проведён глубокий анализ методов и технологий обогащения изотопов урана, показаны их преимущества и степень точности. Особое внимание уделено методам обогащения изотопа урана-235, в частности газодиффузионному и химическому методам, которые изложены подробно.

Кроме того, предложен одноступенчатый метод обогащения изотопа уран-235 с использованием математических уравнений. Приведена система математических уравнений и их решения. Показано, что рассчитанные значения, полученные с помощью одноступенчатого математического метода обогащения урана-235, хорошо согласуются со значениями, полученными другими методами.

Ключевые слова: газодиффузионный метод, изотопное обогащение, изотопный обмен, изотопы урана, химический метод, коэффициент разделения, лазерный метод, магнитное поле, математическое моделирование, математические уравнения, массовый баланс, нейтрон, обогащённый уран, природный уран, разделение изотопов, ядерное топливо, уран-233, уран-235, уран-238.

ENRICHMENT OF URANIUM AND PLUTONIUM ISOTOPES AND THEIR APPLICATION IN NUCLEAR REACTORS

Abstract. In this work, the methods and technologies for uranium isotope enrichment have been thoroughly analyzed, highlighting their relative advantages and levels of precision. The enrichment methods of the Uranium-235 isotope, particularly the gas diffusion and chemical methods, are presented in detail.

Furthermore, a single-stage method for enriching the U-235 isotope based on mathematical equations has been proposed. The system of mathematical equations and their solutions are provided. It has been demonstrated that the calculated values obtained through the single-stage mathematical method for Uranium-235 enrichment correspond closely with the values derived from other established methods.

Keywords: chemical method, diffusion coefficient, enriched uranium, gas diffusion method, isotope enrichment, isotope exchange, isotope separation technology, laser method, magnetic field, mathematical equations, mathematical modeling, mass balance, natural uranium, neutron, nuclear fuel, uranium isotopes, uranium-233, uranium-235, uranium-238.

Kirish. Yadro yoqilg'isi deb - neytronlar ta'sirida bo'linadigan, tarkibida nuklidlar mavjud bo'lgan yadro materiallari (YaM) ga aytiladi. Bo'linuvchi nuklidlarga:

-Uran va toriyning tabiiy izotoplari (^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U , ^{234}U);

-Plutoniyning sun'iy izotoplari (^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu). ^{239}Pu izotopi ^{238}U izotopining tez neytronni qamrashidan va ketma-ket β yemirilishdan hosil bo'ladi).

-Transuran elementlar (*Np, Am, Cm, Bk, Cf*) izotoplari;

-Uraning ^{233}U sun'iy izotopi. Bu izotop ^{232}Th izotopining tez neytronni qamrab 2 marta β^- yemirilishidan hosil qilinadi [1].

Tadqiqot metodologiyasi. Ma'lumki tabiiy uran tarkibida uranning 3 ta izotopi uchraydi, bu izotoplarga:

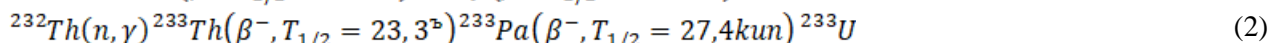
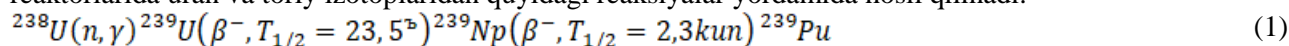
$^{238}\text{U} - 99,25\% \left(T_{\frac{1}{2}} = 4,5 \cdot 10^9 \text{yil} \right)$,

$^{235}\text{U} - 0,71\% \left(T_{\frac{1}{2}} = 0,7 \cdot 10^9 \text{yil} \right)$

$^{234}\text{U} - 0,0056\% \left(T_{\frac{1}{2}} = 2,5 \cdot 10^5 \text{yil} \right)$

kiradi.

Ammo yadro yoqilg'isi sifatida qo'llanadigan ^{233}U va plutoniyning -239,240 va 241 izotoplari yadro reaktorlarida uran va toriy izotoplaridan quyidagi reaksiyalar yordamida hosil qilinadi:



^{239}Pu va ^{233}U izotoplari yadro reaktorlarida yoqilg'i sifatida qo'llaniladi va sun'iy izotoplar hisoblanadi. ^{235}U , ^{239}Pu va ^{233}U izotoplari issiq neytronlar ($\epsilon = 0,025\text{eV}$) ta'sirida bo'linadi. ^{238}U va ^{232}Th izotoplari tabiiy yadro materiali (YaM) hisoblanadi va bu izotoplar tez neytronlar ($\epsilon \approx 1 - 10\text{MeV}$) ta'sirida parchalanadi va to'g'ridan-to'g'ri yadro yoqilg'isi sifatida qo'llanilmaydi, ya'ni yadro xom-ashyosi bo'lib hisoblanadi.

Hozirda yadro energetikasi asosan boyitilgan uran izotoplariga asoslanadi. Boyitilgan uran- ^{235}U bo'linuvchi izotopining miqdori tabiiy urandagi miqdoridan (0,71%) yuqori bo'lgan uran tushuniladi. Hozirgi zamon AESlarining aksariyatini, tarkibida ^{235}U izotopli past boyitilgan (2-5%) uranoksidli yoqilg'isidan foydalanadigan yengil suvli, issiq reaktorlar tashkil qiladi.

Uranni izotop boyitishning bir qator, ko'plab yadro texnologiyalari mavjud. Bularning barchasining asosida ^{238}U va ^{235}U izotoplarining massalari farqini aniqlashga asoslangan. Bu massalar farqi (3 m.a.b) magnit maydonida (elektromagnit usul) ionlashgan atomlarning har xil burchaklarga og'ishiga; atomlarning g'ovak to'siqlar (gaz diffuziyali usul) orqali o'tish tezliklari farqi; markazdan qochma kuchlar maydonida atomlar (molekulalarning) har xil fazoviy taqsimlanishi (gazli sentrafuga usuli); kichik egrilik radiusli

(ajratuvchi sonli usuli) to'siqni aylanib o'tishda atom (molekula)lar turli harakat trayektoriyalariga ega bo'lishiga asoslangan.

Uran izotoplarini ajratishni miqdoriy baholash usulini birinchi marta ingliz fiziklari R. Payerls va P. Diraklar taklif etishgan [2]. Ular izotop birikmalarini xarakterlovchi U funksiyani kiritgan. Bu funksiya birikma miqdori T ni faqat hosil qilingan izotop miqdoridan bog'liq bo'lgan biror o'lchamsiz funksiya $V(C_T)$ ko'paytmasi ko'rinishida ifodalagan,

$$U_T = T \cdot V(C_T)$$

va $V(C_T)$ –funksiyani izotoplarni ajratish potentsiali deb atagan.

Olimlar bu potentsial yordamida birlashgan va boyitilgan uran miqdorlarini aniqlagan.

Olingan natijalar va ularning tahlili. Uranni boyitishning eng asosiy usullaridan biri gaz diffuziya usulidir (GD). Bu usulda issiqlik harakati hisobidan gaz birikmasida massalar ko'chishi jarayoni tushuniladi. GD usuli yordamida uranni boyitish og'ir va yengilroq molekulalarning issiqlik harakati tezliklari farqi hamda yengilroq molekulalarning yupqa g'ovak to'siqchadan o'tish qobiliyatiga asoslangan.

Bir xil temperaturali ikki xil gaz aralashmasida yengil va og'ir molekulalarning kinetik energiyalari ham bir xil,

$$m_e v_e^2 = m_0 v_0^2 \tag{1}$$

ya'ni, yengil molekulaning o'rtacha tezligi og'ir molekulanikidan kattaroq,

$$v_e = v_0 \left(\frac{m_0}{m_e} \right)^{1/2} \tag{2}$$

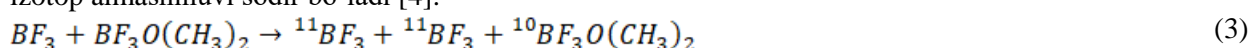
g'ovak to'siq orqali o'tuvchi ikkita gaz aralashmalarining ideal ajratish koeffitsiyenti:

$$\beta = \frac{v_e}{v_0} = \left(\frac{m_0}{m_e} \right)^{1/2} \approx 1 + \Delta m / 2m_e \tag{3}$$

Δm –og'ir va yengil molekulalar massalari farqi. Geksoftorid uran $^{235}\text{UF}_6$ va $^{238}\text{UF}_6$ uchun massalar farqi mos ravishda $m_e = 349$, $m_0 = 352$ va ajratish koeffitsiyenti hamda boyitilishi quyidagiga teng: $\beta = 0,043$; $A = 1 + \beta$, $A = 1 + 0,043$, $A_0 = 0,043\% = 4,3\%$. Gaz diffuziya usuli uran izotoplarini ajratish va boyitishning asosiy usuli hisoblanadi [3].

Bundan tashqari uranni izotop boyitilishining lazer usuli ham mavjud bo'lib bu usul ikki ko'rinishda ro'y berishi aniqlangan [3]. Birinchi ishchi jism-uranning atomar bug'i, ikkinchi-ishchi jism-molekulyar gaz ko'rinishidagi geksafторid uran UF_6 dan iborat. Atomar ajratish lazer nuri yordamida ^{235}U atomlarining tanlab uyg'onishiga asoslangan. So'ngra uyg'ongan atomlar lazer nuri bilan nurlantirilib tanlab ionlashadi va elektromagnit usuli bilan ^{238}U atomlari elektr neytral ko'rinishda uyg'onmagan birikmadan ajratib olinadi. ^{238}U va ^{235}U izotoplarini molekulyar ajratish $^{235}\text{UF}_6$ (geksafторid uran) molekulalarini selektiv uyg'onishiga asoslangan. Jarayonning birinchi bosqichida $^{235}\text{UF}_6$ molekulalari lazer nuri yordamida selektiv uyg'onadi, ikkinchi bosqichda esa $^{235}\text{UF}_6$ ning uyg'ongan molekulalari lazer nurlanishi ta'sirida selektiv dissotsiatsiyalanadi va $^{235}\text{UF}_6$ qattiq kukunini hosil qiladi.

Har xil kimyoviy birikmalarda izotoplarning turli mustahkamligiga asoslangan kimyoviy boyitish usuli ham mavjud. Kimyoviy usulda bitta elementning ikkita har xil kimyoviy birikmalari o'rtasida izotop almashinuv yuz beradi. Alohida izotoplar har holda mustahkamroq birikmalarda to'planadi. Bunga tabiiy borning ^{10}B izotopi bilan boyitilishi misol bo'la oladi. Tabiiy bor-20% ^{10}B izotopidan va 80% ^{11}B izotopidan iborat. Ammo bu izotoplarning issiq neytronlarni qamrash kesimi bir-biridan keskin farq qiladi: ^{11}B izotopi uchun qamrash kesimi 0,005 barn, ^{10}B izotopi uchun esa 3837 barn. Shuning uchun ham yadro reaktorlarini boshqarishda foydalaniladigan borni ^{10}B izotopi bilan boyitish maqsadga muvofiq. BF_3 birikmasini dimetil efirat trifторid bor- $\text{BF}_3\text{O}(\text{H}_3)_2$ bilan aralashganda organik birikmada ^{10}B to'planishi bilan izotop almashinuvi sodir bo'ladi [4]:



Turli valentli uran birikmalarida ham xuddi shunday izotop almashinuv reaksiyasini hosil qilish mumkin. Magnit maydonida ionlar maydon kuch chiziqlari bo'ylab spiral bo'yicha harakatlanadi. ^{235}U va ^{238}U ionlari ma'lum radiusli orbita bo'ylab harakatlanishi natijasida fazoviy ajraladi. Bu esa ^{235}U va ^{238}U izotoplarini alohida-alohida to'plash imkoniyatini beradi. Umumiy izotoplarni boyitish texnologiyasining sifati asosan ikkita parametr bilan baholanadi: effektivlik va energiya sig'im. Boyituvchi texnologiyaning

effektivligi jarayonning birinchi bosqichida birikmada zarur izotopning miqdorini oshirish qobiliyatidir. Boyituvchi texnologiyaning energiya sig'imi esa bir marta ajratish uchun sarflangan elektr energiyasi bilan aniqlanadi.

Biz bu ishda izotoplarni bir-biridan ajratishning matematik usullaridan va tenglamalaridan foydalanamiz. Buning uchun uran ^{235}U izotopini boyitishning prinsipial sxemasini qaraymiz.

Uran misolida dastlabki material massasini M va boyitilishini $C_M(^{235}\text{U})$ deb belgilaymiz. Ajratuvchi bosqich tizimidan so'ng ikkita yangi materialni hosil qilamiz. N miqdorli boyitilganligi $C_N(^{235}\text{U})$ bo'lgan uran va K miqdorli boyitilganligi $C_K(^{235}\text{U})$ bo'lgan birlashgan uran. Uran izotoplarini ajratishning matematik tenglamasini yozamiz: Asosi $M - C_M(^{235}\text{U})$

→Ajratuvchi bosqichlar tizimi

→Birlashgan uran- K (xom ashyo), $C_K(^{235}\text{U})$ to'plam;

→Boyitilgan uran- N (mahsulot), $C_N(^{235}\text{U})$ →yadro yoqilg'isi. Bu tizimlarni ikkita yadro materialini hisobga olgan matematik tenglama bilan ifodalash mumkin:

1) Uranning massa balansi → $M = N + K$

2) ^{235}U izotopining massa balansi →

$$C_M \cdot M = C_N \cdot N + C_K \cdot K \quad (4)$$

ko'rinishda yozish mumkin va natijada uchta noma'lumdan (M, N, K) iborat ikkita tenglamalar sistemasiga ega bo'lamiz. Bu tenglamalar sistemalarini N ga bo'lib ikkita noma'lumdan $\left(\frac{M}{N}\right)$ va $\left(\frac{K}{N}\right)$ iborat tenglamalar sistemasini hosil qilish mumkin.

$$\left. \begin{array}{l} 1) \quad \frac{M}{N} = 1 + \frac{K}{N} \\ 2) \quad C_M \cdot \frac{M}{N} = C_N + C_K \cdot \frac{K}{N} \end{array} \right\} \quad (5)$$

bu tenglamalar sistemasini yechib quyidagi koeffitsiyentlarni hosil qilamiz:

a) birlik mahsulotda tabiiy uran sarfi:

$$\frac{M}{N} = \frac{C_N - C_K}{C_M - C_K} \quad (6)$$

b) birlik mahsulotda birlashgan uran hosil bo'lishi,

$$\frac{K}{N} = \frac{C_N - C_M}{C_M - C_K} \quad (7)$$

Umumiy holda (6) va (7) tenglamalarni quyidagicha yozamiz:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{M}{N} = \frac{C_N(^{235}\text{U}) - C_K(^{235}\text{U})}{C_M(^{235}\text{U}) - C_K(^{235}\text{U})} \\ \frac{K}{N} = \frac{C_N(^{235}\text{U}) - C_M(^{235}\text{U})}{C_M(^{235}\text{U}) - C_K(^{235}\text{U})} \end{array} \right\} \quad (7)$$

v) tabiiy uranning bo'linish oqimi- F

$M = N + K = F \cdot M + (1 - F) \cdot M$, bundan

$$F = \frac{N}{M} = \frac{C_M(^{235}\text{U}) - C_K(^{235}\text{U})}{C_N(^{235}\text{U}) - C_K(^{235}\text{U})} \quad (8)$$

(8) ifoda tabiiy uranning bo'linish oqimini xarakterlaydi.

1) Boyitilish jarayoni xarakteristikasi sifatida bir bosqichli ajratishda birikish yoki boyitilishni xarakterlovchi ajratish koeffitsiyentidan foydalaniladi:

2) Boyitilgan qoldiq bo'yicha ajratish koeffitsiyenti

$$\beta = \frac{D}{D} = \frac{C_N / (1 - C_N(^{235}\text{U}))}{C_M(^{235}\text{U}) / (1 - C_M(^{235}\text{U}))} \quad (9)$$

g) birlashgan qoldiq bo'yicha ajratish koeffitsiyenti;

$$\gamma = \frac{D'}{D''} = \frac{C_M(^{235}\text{U}) / (1 - C_M(^{235}\text{U}))}{C_K(^{235}\text{U}) / (1 - C_K(^{235}\text{U}))} \quad (10)$$

Boyitilish koeffitsiyenti:

$$A = \beta - 1 \quad (11)$$

birlashish koeffitsiyenti:

$$A' = \gamma - 1 \quad (12)$$

bir bosqichda to'liq boyitilish koeffitsiyenti:

$$A_0 = A + A' \quad (13)$$

Yuqorida (9) va (10) tenglamlarni hisobga olsak, to'liq boyitilish koeffitsiyenti uran-235 izotopi uchun turli qiymatlarni qabul qiladi.

Masalan: $A_0 = 0,02(2\%)$, $A_0 = 0,04(4\%)$ va hokazo.

Demak dastlabki uran izotopini M va ajratilgan, boyitilgan uran miqdori N va birlashgan uran miqdorlari K ni aniqlab (7-10) formulalar yordamida ^{235}U izotopini boyitilish darajasini aniqlash mumkin.

Ko'plab yadroviy reaktorlarda, jumladan VVER-1000, RBMK-1000 energetik reaktorlarda (2-4) % boyitilgan uran-235 izotopi qo'llaniladi va bu boyitilish darajasi issiq reaktorlarda zanjir reaksiyasini borishini ta'minlaydi.

Xulosa. Biz [5-6] maqolalarda energetik reaktorlarning (3-5) % boyitilgan $^{235}_{92}\text{UO}_2$ -uran oksidida ishlashini aytgan edik. Mazkur ishda uran-235 izotopining boyitilish darajasi [7] da kimyoviy reaksiyalar natijasida hosil qilingan qiymatlariga karralidir.

Shunday qilib yuqorida keltirilgan matematik tenglamalardan foydalanib ^{235}U izotopini yuqori aniqlikda bir bosqichli boyitish koeffitsiyentini aniqlash mumkin. Olingan natijalar boshqa ko'plab usullar yordamida olingan qiymatlarga to'liq mos keladi.

ADABIYOTLAR:

1. Бекман И.Н. Ядерная физика. Учебное пособие, Москва, МГУ, 2010, 520 с.
2. Дяченко А.Н., Петлик И.В. Передерин А.Т. Введение в технологию ядерного топлива. Учебное пособие. Издательство Томского политехнического университета, 2023, 160 с.
3. АПСЭ В.А., Хмелев А.Н. Ядерные технологии, учебное пособие, Москва, 2008, 127 с.
4. Громов Б.В. Введение в химическую технологию урана / Б.В. Громов.-Москва: Атомиздат, 2008,-336 с.
5. Eshbo`riyev Rashid Majidovich, Abdusamadova Dilfuza Iskandar qizi, Sharipov Dilshod Elmurod o`g`li, Fayzullaeva Mukarram Lutfullo qizi. Yadro energiyasini hosil qilish muammolari. // Buxoro davlat universiteti Ilmiy axboroti. 6-son. 2025-yil. 159-164 betlar.
6. Abdusamadova D.I., Eshburiyev R.M., Fayzullaeva M., Sharipov D. The advantages of nuclear energy over other energy sources. // Texas Journal of Engineering and Technology ISSN No: 2770-4491 <https://zienjournals.com> May 2025. // Peer Reviewed International Journal Volume 44. 8-12 pages.
7. Rashid Eshbo`riev, Muhayyo Ubaydullaeva, Mukarram Fayzullaeva, Dilfuza Abdusamadova. Investigation of nuclear fuel characteristics based on uranium isotopes. // Web of scientist: international scientific research journal. ISSN: 2776-0979, Volume 6, Issue 10, October- 2025. 28-38 pages.

**KUBIK SIMMETRIYALI KRISTALLARINING AKUSTIK XOSSALARI
ANIZOTROPIYASI VA RELAKSATSIYA VAQTLARI**

Axmedjanov Farxad Rashidovich,
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi
Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti
akhmedzhanov.f@gmail.com

Maharov Nodir Mamadiyor o‘g‘li,
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi,
Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti
maxarovnodir217@gmail.com

Avdievich Vladimir Nikolaevich,
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi
Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti
avdievich@iplt.uz

Annotatsiya. Ushbu maqolada kubik simmetriyaga ega bo‘lgan KBr, NaBr, NaCl va MgO kristallarining akustik xossalari keng ko‘lamda eksperimental ravishda tadqiq etilgan. Tadqiqotda impulsli interferensiya usuli qo‘llanilib [100], [110] va [111] kristolografik yo‘nalishlar bo‘ylab bo‘ylama va ko‘ndalang akustik to‘lqinlarning tarqalish tezliklari hamda ularning so‘nish koeffitsiyentlari yuqori aniqlik bilan o‘lchangan. Olingan natijalar asosida kristallarning haqiqiy va mavhum elastiklik konstantalari aniqlanib Akheizer mexanizmi asosida akustik fononlarning relaksatsiya vaqtlariga baho berilgan. Shuningdek, MgO kristallida so‘nish koeffitsiyentining temperaturaga bog‘liqligi o‘rganilib issiqlik ta‘sirida akustik xossalarning o‘zgarish tendensiyasi aniq ko‘rsatilgan. Ushbu tadqiqot natijalari kubik galogenid kristallarining akustik, termoeastik va akustooptik qurilmalarda qo‘llanilishi uchun asos yaratadi hamda materiallarning anizotrop elastik xatti xarakterlarini chuqur tushunishga yordam beradi.

Kalit so‘zlar: kubik kristallar, impulsli interferensiya, anizotropiya, akustik to‘lqin, qutblanish vektori, to‘lqin vektori, so‘nish koeffitsiyenti, elastik doimiy, to‘lqin tezligi.

**АНИЗОТРОПИЯ И ВРЕМЕНА РЕЛАКСАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
КУБИЧЕСКИХ СИММЕТРИЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ**

Аннотация. В данной статье проведено обширное экспериментальное исследование акустических свойств кубических кристаллов KBr, NaBr, NaCl и MgO. В ходе исследования с использованием метода импульсной интерференции с высокой точностью измерены скорости распространения продольных и поперечных акустических волн вдоль кристаллографических направлений [100], [110] и [111], а также их коэффициенты затухания. На основании полученных результатов определены действительные и абстрактные упругие постоянные кристаллов, а также оценены времена релаксации акустических фононов на основе механизма Ахейзера. Также изучена температурная зависимость коэффициента затухания в кристаллах MgO, и наглядно показана тенденция к изменению акустических свойств под воздействием тепла. Результаты данного исследования создают основу для применения кубических галогенидных кристаллов в акустических, термоупругих и акустooptических устройствах и способствуют более глубокому пониманию анизотропного упругого поведения материалов.

Ключевые слова: кубические кристаллы, импульсная интерференция, анизотропия, акустическая волна, вектор поляризации, волновой вектор, коэффициент затухания, упругая постоянная, скорость волны.

**ANISOTROPY AND RELAXATION TIMES OF ACOUSTIC PROPERTIES
OF CUBIC SYMMETRICAL CRYSTALS**

Abstract. In this article, the acoustic properties of cubic symmetry KBr, NaBr, NaCl, and MgO crystals have been extensively experimentally investigated. In the study, the propagation velocities of longitudinal and transverse acoustic waves along the [100], [110], and [111] crystallographic directions and their extinction coefficients were measured with high accuracy using the pulsed interference method. Based on the results obtained, the real and abstract elastic constants of the crystals were determined, and the relaxation times of acoustic phonons were estimated based on the Akheizer mechanism. Also, the temperature dependence of the extinction coefficient in MgO crystals was studied, and the tendency of the

acoustic properties to change under the influence of heat was clearly shown. The results of this study create a basis for the application of cubic halide crystals in acoustic, thermoelastic, and acousto-optic devices, and contribute to a deeper understanding of the anisotropic elastic behavior of materials.

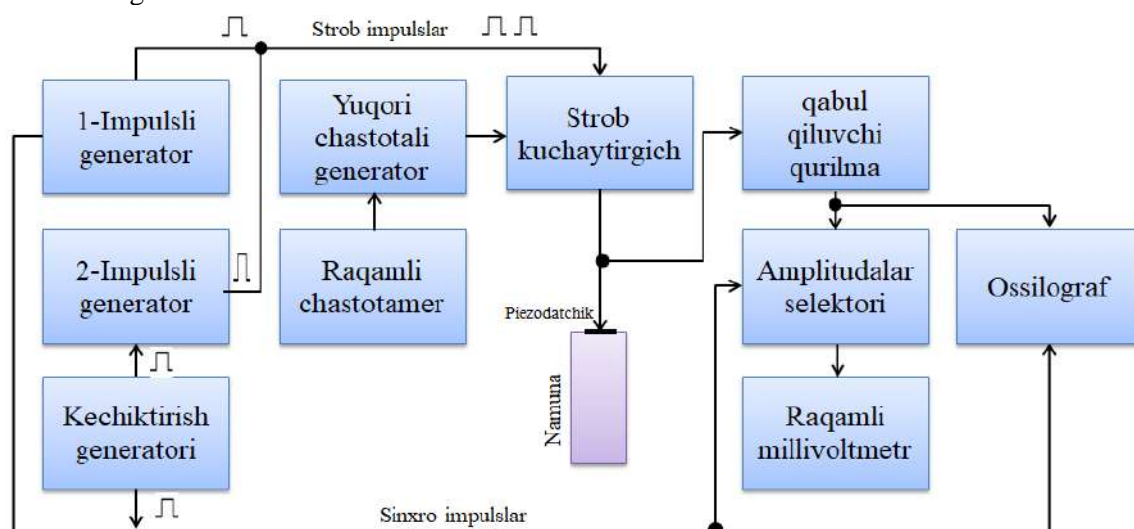
Keywords: cubic crystals, pulse interference, anisotropy, acoustic wave, polarization vector, wave vector, attenuation coefficient, elastic constant, wave velocity.

Kirish. Kubik simmetriyali galogenid kristallari jumladan KBr NaBr NaCl va MgO Fm3m simmetriyaning kubik nuqta guruhiga kiradi va ko‘plab fizik xususiyatlarda izotropdir. Biroq, elastiklik xususiyatlariga ko‘ra, bu kristallar anizotropikdir va ularni akustik va akusto-optik qurilmalarda qo‘llash akustik to‘lqinlarning tarqalish tezligi va zaiflashuv koeffitsienti kabi muhim xususiyatlarning orientatsiya bog‘liqligini bilishni talab qiladi [1-3]. Ushbu qurilmalarda ishlaydigan muhit ko‘pincha ko‘rinadigan va infraqizil elektromagnit to‘lqinlarda yuqori elastik va fotoelastik konstantalarga ega bo‘lgan Magniy oksidi kabi galogenid gidroksidi kristallari ishlatiladi [1-4].

Tarqalish tezligi va ulardagi so‘nish koeffitsienti past ultratovush chastotalari diapazonida yetarli darajada batafsil o‘rganilgan, bunda so‘nish Axiezer mexanizmi [5-7] bo‘yicha kvadratik qonun bo‘yicha chastotaga bog‘liq. Shu bilan birga, yuqori chastotalarda bunday tadqiqotlar deyarli yo‘q, chunki ulardan foydalanishni cheklovchi asosiy omil zaiflashuv koeffitsientining katta qiymati hisoblanadi. Shu munosabat bilan ushbu ishda ishqor galogenid kristallarining gomologik qatoridagi uzunlamasina va ko‘ndalang akustik to‘lqinlarning tarqalish tezligi, samarali elastik konstantalari va susaytirish koeffitsienti ultratovush usullari yordamida o‘rganildi.

Tadqiqot metodologiyasi. KBr, NaBr va NaCl kristallari klassik NaCl-tipi panjara tuzilmasiga ega bo‘lib, bu tuzilma kubik simmetriyaning Fm3m fazoviy guruhiga kiradi. Magniy oksidi (MgO) kristali ham shu turdagi tuzilmani namoyon qiladi va o‘xshash fazoviy guruhga mansub hisoblanadi. Bunday kristallarning simmetriya xususiyatlari ularning elastik va akustik xossalarini izchil o‘rganish imkonini beradi chunki kristall panjarasining yuqori darajadagi simmetriyasi fizik kattaliklarning aniq yo‘nalishlarda o‘lchanishini soddalashtirish imkonini beradi. Kristallar namunalarining shakli kubik prizma bo‘lib, kubning qirradi taxminan 15 mm ni tashkil etadi. Namunalarning yuzalari kristallofizik o‘qlar [100], [010] va [001] yo‘nalishida yo‘naltirilgan bo‘lib. Bunday yo‘naltirish barcha to‘lqin turlari bo‘yicha o‘lchovlarni bir xil namunalar asosida amalga oshirishga imkon beradi. Bu esa, har xil namunalar o‘rtasidagi o‘qlar orientatsiyasi farqlari, strukturaviy nuqsonlar kabi turli omillarning eksperimental natijalarga ta‘sirini kamroq bo‘lishiga yordam beradi.

Biz akustik to‘lqinlarning tezligini va so‘nish koeffitsiyentini aniqlash uchun Impulsli interferensiya usulidan foydalanamiz[9]. Ushbu usulning mohiyati shundaki unda tadqiq qilinayotgan namunadan turlicha yo‘l bosib otgan akustik to‘lqinlarning fazalar farqi taqqoslanadi. Past chastotali o‘lchov tizimining asosiy qismlaridan biri **amplituda selektori** bo‘lib, u faqat ma‘lum vaqt oralig‘ida ochiladi. Mazkur vaqt oralig‘i signalning kerakli qismigina o‘tishiga imkon beradi. Quyidagi rasmdan Impulsli interferensiya usulining blok sxemasi keltirilgan.



1-rasm. Akustik o‘lchov tizimining blok-sxemasi [10]

Sxemada quyidagi qurilmalardan foydalanilgan: yuqori chastotali elektromagnit tebranishlar generatori, strob kuchaytirgich, qabul qiluvchi (detektor), va ikkita impuls ketma-ketligining bir-biriga nisbatan kechikishini 0.01 mikrosekundgacha aniqlikda ta‘minlay oluvchi impulsli signal generatorlari va

kechikish generatoridan tashkil topgan diskret kechikish tizimi. Namunaga yuboriluvchi radioimpulsni yaratish uchun maxsus kuchaytirgich – rezonansli strob kuchaytirgich ishlatiladi. Bu kuchaytirgich hosil qilgan radioimpuls namunaga ulangan pyezodatchikka yuboriladi. Pyezodatchikda quyidagi bosqichlar bajariladi: radioimpulsni tovush (elastik) impulsga aylantiradi; namunaning qarama qarshi tomonidan qaytgan tovush impulslarini yana radioimpulsarga aylantirib qabul qiladi. Qabul qilgichda hosil bo'lgan sekin-asta so'nuvchi radio-ehoimpuls ketma-ketligi amplituda bo'yicha kuchaytiriladi. Bu yerda qabul qilgich sifatida kuchaytirish darajasi 100 dB gacha sozlanadigan maxsus rezonansli kuchaytirgich qo'llaniladi. Kuchaytirgich tarkibidagi amplitudaviy detektor radioimpuls ketma-ketligini mos keluvchi videoimpuls ketma-ketligiga aylantiradi. Kuchaytirgich kirishidagi attenuator (signalni zaiflashtiruvchi qurilma) va kuchaytirish darajasining sozlanishi yordamida kuchaytirgichning chiziqli rejimi (ya'ni, signalni buzmasdan kuchaytirish) taminlanadi. Qabul qilgichdan kelgan impuls yuboriladigan amplitudaviy selektor orqali impuls ketma-ketligidan keraklisini tanlab olish mumkin. Tanlangan impulsning amplitudasini voltmetr yordamida o'lchash amalga oshiriladi. Qo'shni ikkita impuls amplitudalari — A_1 va A_2 , hamda namuna uzunligi L bo'yicha akustik to'lqinlarning so'nish koefitsiyenti quyidagi formula yordamida aniqlanadi [11].

$$\alpha = \frac{20 \lg \left(\frac{A_k}{A_n} \right)}{2L(k-n)} \quad (1)$$

Bu yerda L — namunani uzunligi. So'nish koefitsientini aniqlash aniqligi esa taxminan 5 % ni tashkil etadi. Bunday aniqlikka erishish uchun impuls amplitudalari bir necha marta o'lchandi va olingan natijalar keyinchalik o'rtacha qiymatlarga keltiriladi qilindi.

Generatorning uzluksiz tebranish chastotasi o'zgartirilganda kuzatiladigan interferensiya minimumlari yoki impuls amplitudasining maksimumlari yordamida namunadagi akustik to'lqin tezligi V quyidagi munosabat asosida aniqlanadi [9]:

$$V=2L \cdot \Delta v \quad (2)$$

Bu yerda Δv — yuqori chastotali generatorning qarama-qarshi fazali interferensiyaga mos keluvchi ikki qo'shni chastotalar farqi. Ushbu chastotalar raqamli chastotomer yordamida o'lchangan bo'lib, u chastotalar farqini ± 10 Gts aniqlik bilan aniqlash imkonini beradi. Akustik to'lqin tezligini aniqlashdagi umumiy aniqlik esa namuna uzunligini o'lchashdagi aniqlik bilan chegaralangan va taxminan 0,01 % ni tashkil etgan.

Shuningdek ushbu ishda Akustik fononlarning relaksatsiya vaqtlari ham aniqlangan. Relaksatsiya vaqtlarini aniqlashda quyidagi formuladan foydalanilgan[12]:

$$\tau = \frac{3c_{eff}''}{\gamma^2 C_V T \omega} \quad (3)$$

Bu yerda C_{eff}'' -kristallarning mavhum elastiklik koefitsiyenti, γ - grunayzen parametri, C_V - kristallarning hajmiy issiqlik sig'imi, T - temperaturaning kelvin qiymati, ω - akustik tolqin chastotasi.

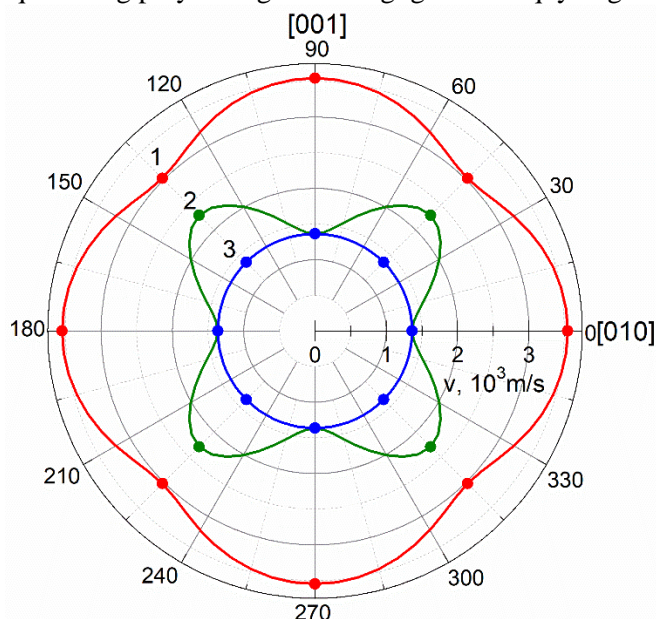
Natijalar va muhokama. [100], [110] kristallografik yo'nalishlar bo'ylab bo'ylama va ko'ndalang akustik to'lqinlarning so'nish koefitsientlarini aniqlash natijalari hamda tadqiq qilingan kristallar uchun hisoblangan haqiqiy va mavxum samarali elastiklik konstantalari qiymatlari 1-jadvalda keltirilgan. Akustik to'lqinlarning tezlik qiymatlari esa adabiyotdagi ma'lumotlar bilan yaxshi mos kelgani sababli ular 1-jadvalda keltirilmagan.

1-jadval.

KBr, NaBr va RbBr kristallarida akustik to'lqinlarning so'nish koefitsiyenti ($\nu = 1$ GGts da) hamda samarali haqiqiy va mmin elastiklik konstantalar qiymatlari

q	η	$c'_{eff}, 10^{10} \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$			$\alpha, \text{ dB}\cdot\mu\text{s}^{-1}$			$c''_{eff} 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$		
		KBr	NaBr	MgO	KBr	NaBr	MgO	KBr	NaBr	MgO
[100]	[100]	3.52	3.96	28.6	38	25	4.34	4.82	3.7	4.56
	[001]	0.51	0.99	14.8	6.0	3.1	0.60	0.11	0.11	0.33
[110]	[110]	2.55	3.49	33.4	28	17	1.90	2.81	2.01	2.33
	[110]	1.48	1.47	9.95	40	34	7.01	2.12	1.79	2.56
	[001]	0.51	0.99	14.8	6.0	3.1	0.60	0.11	0.11	0.33
[111]	[111]	2.22	3.33	35.06	26.4	11.9	1.23	2.14	1.45	1.59
	[110]	1.15	1.31	11.56	34.8	25.6	4.26	1.45	1.23	1.81

O'rganilgan barcha kristallar uchun elastiklik tenzori haqiqiy va mavhum qismlarining uchta mustaqil komponentalari barcha kristalografik yo'nalishlar bo'yicha o'lgangan bo'ylama va ko'ndalang to'lqinlarning tezligi va so'nish koeffitsiyentlaridan aniqlangan. Jadvalda keltirilgan ma'lumotlar asosida KBr kristali uchun akustik to'lqinlarning polyar diagrammadagi grafiklari quyidagi ko'rinishda bo'ladi.



2-rasm. Kaliy brom kristallaridagi akustik to'lqin tarqalish tezligi sirtlarining (100) tekislik bo'yicha ko'rinishi: 1 - kvazi-bo'ylama, 2 - kvazi-ko'ndalang, 3 - sof ko'ndalang akustik to'lqinlar

1-jadvaldagi ma'lumotlar asosida aniqlangan akustik fononlarning relaksatsiya vaqtlari va grunayzen parametrining qiymatlari 2- jadvalda keltirilgan. Fonon relaksatsiya vaqtlarini aniqlashda 3- formuladan foydalanilgan.

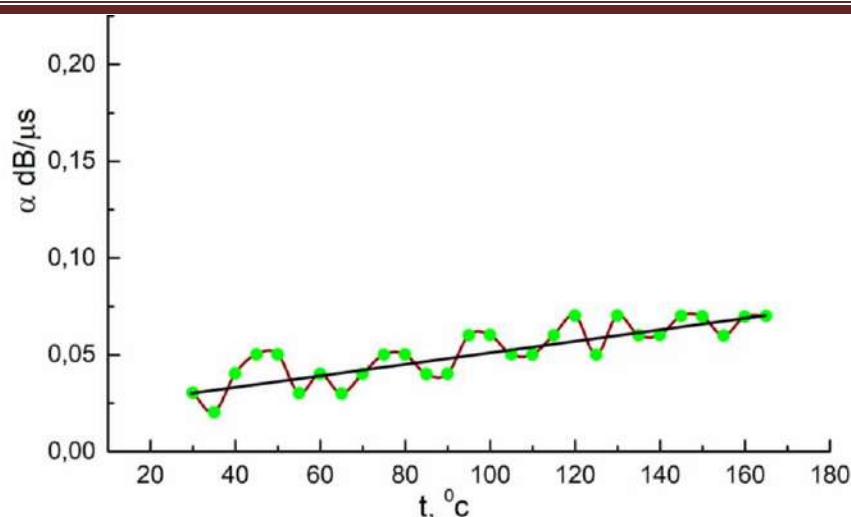
2-jadval.

KBr, NaBr, NaCl va MgO kristallari uchun grunayzen parametri va relaksatsiya vaqtlari

q	η	γ _{eff}				τ 10 ⁻¹² s			
		KBr	NaBr	NaCl	MgO	KBr	NaBr	NaCl	MgO
[100]	[100]	2.60	2.1	2.50	2.58	9.5	9	4.15	3.48
	[001]	0.48	0.44	0.51	0.69	6.35	6.15	2.81	3.5
[110]	[110]	2.32	1.94	1.78	1.69	6.94	5.78	4.15	4.1
	[110]	2.47	1.67	2.28	1.77	4.62	6.95	2.64	4.15
	[001]	0.56	0.48	0.53	0.63	4.66	5.17	2.6	4.22
[111]	[111]	2.51	1.63	1.48	1.38	4.52	5.9	4.3	4.24
	[110]	2.17	1.86	1.94	1.48	4.1	3.54	2.26	4.2

2- jadvaldan ko'rishimiz mumkunki, KBr, NaBr, NaCl va MgO kristallaridagi akustik fononlarning turli yo'nalishlarda va qutublanishlarda tarqalish vaqtida yuzaga keladigan angarnoniklik va relaksatsiya vaqtlari keltirilgan. [100] yo'nalish bo'yicha grunayzen parametri boshqa yonalishlarga nisbatan katta qiymatlarga ega bu ushbu yo'nalishda panjara atomlarining angarnoniklik darajasi yuqori ekanligini ko'rsatadi. E'tibor qilsak shu yo'nalishda fononlarning relaksatsiya vaqtlari ham katta bu fononlarning uzoq yashashini va akustik to'lqinlarning so'nishi sekin kechishini bildiradi. Shuningdek biz MgO Kubik simmetriyalik kristallarida Akustik to'lqinlarning so'nish koeffitsiyentining temperaturaga bog'liqligi o'rganilgan va olingan natijalar grafik ko'rinishida keltirilgan.

MgO kristallari uchun so'nish koeffitsiyentining temperaturaga bog'liqligi hona haroratidan 170°C gacha o'lgandi. Grafikda ko'k rangli nuqtalar o'lgan natijalarini ko'rsatadiva ko'rishimiz mumkinki akustik to'lqinlarning so'nish koeffitsiyenti temperatura ortishi bilan chiziqli ortadi bunga sabab esa kristal panjara atomlarining issiqlik natijasida tebranishi va fonon harakatiga qarshiligining ortishi hisoblanadi.



3- rasm. MgO kristalining [110] yoʻnalish boʻyicha akustik toʻlqinlari soʻnish koeffitsiyentining temperaturaga bogʻliqligi

Xulosa. Tadqiqot natijalari shuni koʻrsatdiki, kristall panjarasining simmetriyasi yuqori boʻlishiga qaramay, elastik xossalar sezilarli darajada anizotrop boʻlib, akustik toʻlqinlarning tezligi va yoʻqolish koeffitsiyenti kristallografik yoʻnalishga kuchli bogʻliqdir. Grunayzen parametrlari va relaksatsiya vaqtlarining qiymatlari fononlarning angarmon harakatini chuqur tushunish imkonini berdi. Xususan, [100] yoʻnalishida relaksatsiya vaqtlarining yuqori boʻlishi ushbu yoʻnalishda fononlarning uzoq umrli ekanini koʻrsatadi. MgO kristallida oʻtkazilgan temperatura tajribalari esa soʻnish koeffitsiyentining harorat oshishi bilan deyarli chiziqli ortishini tasdiqladi. Bu hodisa issiqlik tebranishlarining kuchayishi va fononlarning oʻzaro toʻqnashuv chastotasining ortishi bilan izohlanadi. Olingan natijalar kubik galogenid kristallarining akusto-optik, akustik, termoelastik va yuqori aniqlik talab qilinadigan sensor qurilmalarda qoʻllanishi uchun muhim ilmiy asos yaratadi. Bundan tashqari, materiallarning anizotrop elastik xatti-harakatlarini chuqurroq tushunishga, fonon kinetikasini baholashga va akustik qurilmalar parametrlarini optimallashtirishga xizmat qilishi mumkin.

ADABIYOTLAR:

1. D. Royer, E. Dieulesaint. *Elastic Waves in Solids II /Generation/Acousto-optic Interaction/Applications.* (Verlag Berlin Heidelberg, Springer, 2000), p. 474.
2. Newnham R.E. *Properties of Materials /Anisotropy/Symmetry/Structure.* (New York, Oxford University Press, 2005), p. 378.
3. Ахмеджанов Ф.Р., Курбанов Ж.О., Махаров Н.М. *Затухание акустических волн в кубических кристаллах фторида лития. Доклады АН РУз. Вып. 5. 2021, С. 11-15.*
4. *Акустические кристаллы. Справочник /Под ред. М. П. Шаскольской. – М. Наука, 1982, 632 с.*
5. Akhiezer A. *About Sound Absorption in Solids, J. of Experimental and Theoretical Physics (SU).* - Moscow, 1938. - No 8, - P. 1318-1329.
6. Nava R., Vecchi M.P., Romero J. and Fernandez B. *Akhiezer damping and the thermal conductivity of pure and impure dielectrics. // Phys. Rev. B. Vol. 14, No 2. 1975, P. 800-807.*
7. Логачев Ю. А., Мойжес Б. Я. *К теории поглощения звука по Ахиезеру. – ФТТ. - Санкт-Петербург, 1974, - Т. 16. - № 8, - С. 2219-2223.*
8. Akhmedzhanov F.R., Kurbanov J.O., Boltabaev A.F., *Attenuation of acoustic waves in single-domain and polydomain LiTaO3 crystals, Sensors & Transducers 246, No.7, 2020. P. 43-47.*
9. Ахмеджанов Ф.Р., Азаматов З.Т., Болтабаев А.Ф., Саидвалиев У.А., Хусаинов И. *Устройство для прецизионного определения скорости акустических волн в материалах. Патент, № FAP 01545 (28.09.2020)*
10. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. *Ультразвуковые методы в физике твердого тела. - М.: Мир, 1972. - 307 с.*
11. Y. Liao, T. Shiga, M. Kashiwagi & J. Shiomi, *Akhiezer mechanism limits coherent heat conduction in phononic crystals, Phys. Rev. B 98, 134307 (2018).*

**THERMAL STABILITY OF ELECTRICAL PARAMETERS OF SILICON WITH
NANOCLUSTERS OF MANGANESE ATOMS**

Mavlonov Giyosiddin Khaydarovich,
Tashkent State Technical University,
University St., 2, 100095, Tashkent, Uzbekistan
Uralbaev Khurshid,
Tashkent State Technical University
xurshiduz5427@gmail.com
Tachilin Stanislav Anatolevich,
Tashkent State Technical University
Isakov Bobir Olimjonovich,
Tashkent State Technical University
Ibodullaev Shokhboz Nizom ugli,
Tashkent State Technical University

Abstract. A comprehensive study of the relative change of resistivity from temperature and annealing time in $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples with different concentrations of manganese atoms nanoclusters has been carried out. It was found that with increasing concentration of nanoclusters of manganese atoms, the thermal stability of $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ samples significantly improves, where at the concentration of nanoclusters $N=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ up to the annealing temperature $T=125 \text{ }^\circ\text{C}$ decay is practically not observed, that is, the samples retain their initial electro physical parameters, NMR and the value of impurity photoconductivity

Keywords: semiconductor, silicon, nanocluster, manganese, boron, negative magneto resistance.

**MARGANETS ATOMLARI BILAN LEGIRLANGAN KREMNIY NANOKLASTERLARI
ELEKTR PARAMETRLARINING ISSIQLIK BARQARORLIGI**

Annotatsiya. Marganets atomi nanoklasterlarining turli konsentratsiyalariga ega $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ namunalarida qarshilikning tovlash harorati va vaqti bilan nisbiy o'zgarishini o'rganish uchun keng qamrovli tadqiqot o'tkazildi. Marganets atomi nanoklasterlari konsentratsiyasining ortishi bilan $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ namunalarining issiqlik barqarorligi sezilarli darajada yaxshilanishi aniqlandi. $N=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ nanoklaster konsentratsiyalarida va $T=125 \text{ }^\circ\text{C}$ tovlash haroratida deyarli parchalanish kuzatilmaydi, bu namunalar boshlang'ich elektrofizik parametrlarini, MMQ va kirishma fotoo'tkazuvchanligini saqlab qolishini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: yarimo'tkazgich, kremniy, nanoklaster, marganets, bor, manfiy magnit qarshilik.

**ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЯ С
НАНОКЛАСТЕРАМИ АТОМОВ МАРГАНЦА**

Аннотация. Проведены комплексные исследования относительного изменения удельного сопротивления от температуры и времени отжига в образцах $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ с различной концентрацией нанокластеров атомов марганца. Установлено, что с ростом концентрации нанокластеров атомов марганца, существенно улучшается термостабильность образцов $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$, где при концентрации нанокластеров $N=10^{15} \text{ см}^{-3}$ до температуры отжига $T=125 \text{ }^\circ\text{C}$ распад практически не наблюдается, то есть образцы сохраняют свои исходные электрофизические параметры, ОМС и величину примесной фотопроводимости.

Ключевые слова: полупроводник, кремний, наноклaster, марганец, бор, отрицательное магнитосопротивление.

Introduction. Unlike other semiconductor materials doped with paramagnetic impurity atoms [1-4], silicon with nanoclusters of manganese atoms is characterized by huge negative magnetoresistance (NMR) which is not conventional for other silicon-based materials. This anomalous huge NMR manifests itself at room temperature. Silicon with nanoclusters of manganese atoms is also characterized by high impurity photoconductivity in the region $\lambda=10\div 1.5 \text{ }\mu\text{m}$ [5, 6].

The thermal stability of electrical parameters of manganese-doped silicon samples without nanoclusters was studied in [7]. According to the results of this study, at annealing $T \geq 100$ °C for 30÷40 minutes the material properties tend to change significantly whereas at annealing duration $t = 1,5 \div 2$ hours a complete decay of parameters is observed, i.e. the material acquires its initial electrical parameters. It can be concluded that the compensation in boron- and manganese- doped silicon samples is thermally unstable. This can be explained by the change in the electronic state of manganese multi-atomic complexes in the silicon lattice or by disintegration of neutral boron-manganese complexes. How thermal annealing affects the state of manganese clusters and, consequently, the electrical properties of silicon with nanoclusters of manganese atoms is of great importance.

In [8-10], when studying the state of manganese atoms in silicon by electric paramagnetic resonance (EPR), it was shown that under certain doping conditions the manganese impurities forms nanoscale clusters consisting of four manganese atoms located in the nearest equivalent interstitial positions around the boron atoms in the silicon lattice.

Materials and methods. To ensure the process of formation of nanoclusters in silicon samples, *p*-type single-crystalline silicon with resistivity $\rho = 5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ($p = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) was used as a starting material. Doping with manganese was carried out using a newly developed technology [1-3, 11]. The doping conditions were chosen so as to receive *p*-Si<B, Mn> samples with resistivity in the range of $6 \cdot 10^2 < \rho \leq 10^5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ at $T = 20$ °C.

The electrical parameters of the samples (Table 1.) were measured on an Ecopia Hall Effect Measurement Systems HMS7000.

The *p*-Si<B, Mn> type samples with nanoclusters with resistivity $\rho \sim (6 \div 8) \cdot 10^3 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ exhibit anomalously large negative magnetoresistance (NMR), the value of which reaches more than $\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim 100\%$ at room temperature, as well as very high subband (impurity) photoconductivity [2-4]. As the resistivity of the samples changes toward lower or higher values than $\rho \sim (6 \div 8) \cdot 10^3 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$, the magnitude of NMR decreases. In overcompensated *n*-Si<B, Mn> samples, a small PMR is always observed regardless of their resistivity.

Results and discussion.

Table 1.

Electrical parameters of the samples

Diffusion method	Samples obtained	Type	$\rho, \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$	$\mu, \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	$N_{n, p}, \text{ cm}^{-3}$	Type and value of magnetoresistance
By applying novel technology	Si<B, Mn> with nanoclusters	p	$7 \cdot 10^2$	98	$9,1 \cdot 10^{13}$	19 % NMR
	Si<B, Mn> with nanoclusters	p	$7,5 \cdot 10^3$	72	$1,15 \cdot 10^{13}$	100 % NMR
	Si<B, Mn> with nanoclusters	p	$2 \cdot 10^4$	128	$2,44 \cdot 10^{12}$	46 % NMR
	Si<B, Mn> with nanoclusters	p	$4,1 \cdot 10^4$	145	$1,05 \cdot 10^{12}$	33 % NMR
	Si<B, Mn> with nanoclusters	p	10^5	224	$2,79 \cdot 10^{11}$	10 % NMR
	Si control	p	5,18	365	$3,7 \cdot 10^{15}$	3-4 % PMR
By applying standard technology	Si<B, Mn> without nanoclusters	p	$6,8 \cdot 10^2$	245	$3,7 \cdot 10^{13}$	4 % PMR
	Si<B, Mn> without nanoclusters	p	$7,3 \cdot 10^3$	271	$3,15 \cdot 10^{12}$	6 % NMR
	Si<B, Mn> without nanoclusters	p	$4 \cdot 10^4$	214	$5,84 \cdot 10^{11}$	2 % PMR
	Si control	p	5,2	352	$3,41 \cdot 10^{15}$	3-4 % PMR

In the samples where the maximum NMR is observed, the hole mobility was significantly smaller than the hole mobility in materials with the same resistivity obtained by conventional high-temperature diffusion and in general was $\mu = 70\text{-}150 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ [1].

The obtained manganese-doped samples had p -type conductivity, no overcompensated n -type samples were observed.

According to calculations, in the samples $\rho \sim (7 \div 8) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ the Fermi level is in the position $F = E_V + 0.38 \text{ eV}$, i.e. it is in the lower half of the band gap of silicon. This allows us to assert that in these samples the majority of manganese atoms is strongly ionized state and is most likely in the state Mn^{+2} , since according to [12], interstitial manganese atoms in silicon are donor impurities and create energy levels in the upper half of the band gap of silicon with ionization energy $E_1 = E_C - 0.27 \text{ eV}$ and $E_2 = E_C - 0.5 \text{ eV}$. Mn^{+2} ions. These ions, in turn, can form nanoscale charged complexes like BMn_4 .

The presence of such nanoclusters of manganese atoms in the studied samples was confirmed by the study of the state of manganese atoms by EPR method, and their high degree of ionization by AFM [11, 13].

The obtained samples at room temperature were characterized by large negative magnetoresistance up to 100%, as well as high impurity photoconductivity in the spectral region $\lambda = 10 \div 1.5 \mu\text{m}$ at temperature $T = -193 \text{ }^\circ\text{C}$, which is characteristic of samples with nanoclusters of manganese atoms [1-6].

Simultaneously, $p\text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$ samples doped with manganese using a typical standard high-temperature diffusion technique [7] with similar parameters but without nanoclusters were received on the basis of p -type silicon with $\rho = 5 \Omega \cdot \text{cm}$. The absence of nanoclusters in these samples was also confirmed by EPR.

Temperature annealing of samples was carried out stepwise in a vacuum tube furnace MG17-60/300 with high accuracy of temperature maintenance ($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) and annealing time $t = 30$ minutes (± 10 seconds). After each heat annealing step, the samples were chemically treated with 10% HF solution to remove the SiO_2 layer, while the electrical properties of the samples were investigated under identical conditions.

Fig. 1 shows the relative change in resistivity of the studied samples as a function of annealing time at $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. As can be seen, the resistivity of the material in $p\text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$ samples with nanoclusters practically does not depend on the annealing time (curve 1). At the same time in $p\text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$ samples without nanoclusters (without formation of nanoclusters) the electrical parameters change significantly with increasing annealing time, at annealing $t = 300$ minutes, where there is almost a complete decomposition of complexes containing manganese atoms (curve 2). After complete decay in $p\text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$ samples with nanoclusters, the anomalously small value of hole mobility increase to the value $\mu = 360 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ as in the original sample.

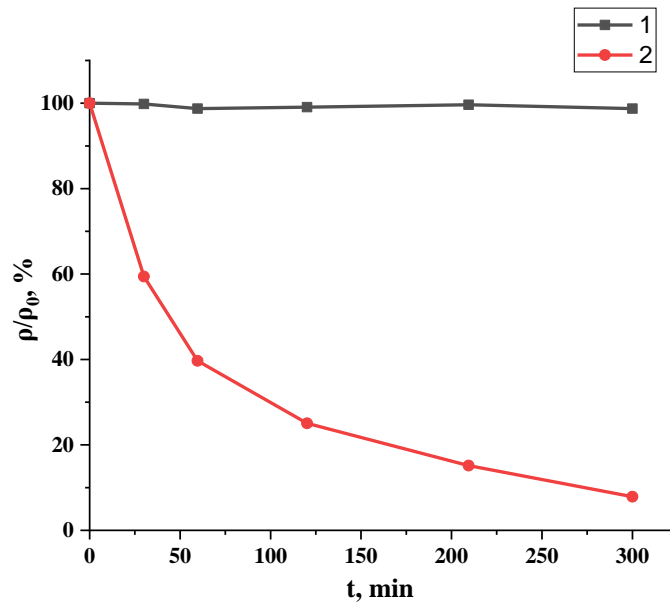
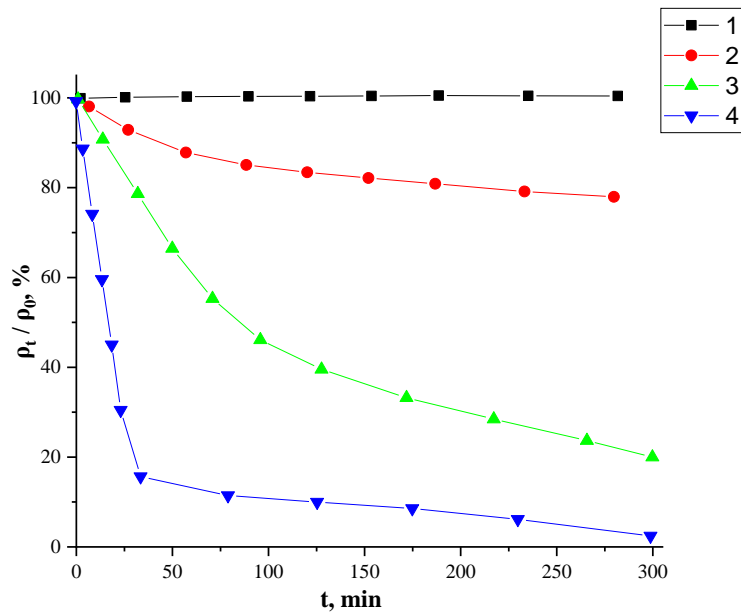


Figure 1. Relative change in resistivity of manganese-doped silicon samples from annealing time at $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$: 1- with nanoclusters, 2- without nanoclusters

Shortly after we investigated $p\text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$ samples with nanoclusters to determine up to what temperature they maintain the stability of their electro physical parameters (Fig. 2). The results show that no decay is revealed in silicon samples with nanoclusters up to annealing temperature of $110 \text{ }^\circ\text{C}$ for a long time (7 days). With increasing temperature up to $T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ a noticeable decomposition starts at annealing time greater than 1 hour.



**Figure 2. Relative change in resistivity of *p*-Si<B, Mn> silicon samples with nanoclusters of manganese atoms at different annealing temperatures:
1- 100 °C, 2- 125 °C, 3- 140 °C, 4- 160 °C**

Thermal stability studies were also carried out on samples having different contents of manganese clusters. For this purpose, *p*-type Si samples doped with boron $\rho=10 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$, $\rho=5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ and $\rho=2 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ were used as a starting material [1]. Samples of *p*-Si<B, Mn> with different concentration of nanoclusters were fabricated by the technology similar to [2, 10] with the condition of obtaining samples with resistivity $\rho=(7\div 8)10^3 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ at $T=27 \text{ } ^\circ\text{C}$. Taking into account almost complete compensation of boron impurity in these samples by manganese, one could estimate the concentration of nanoclusters as: $N_{(\text{Mn})4}=2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (*p*-type Si doped with boron $\rho=10 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ starting material), $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (*p*-type Si samples doped with boron $\rho=5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ starting material), 10^{15} cm^{-3} (*p*-type Si samples doped with boron $\rho=2 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ starting material) [1].

The relative variation in resistivity with annealing time in *p*-Si<B, Mn> samples with different concentrations of manganese atom nanoclusters is shown in Fig. 3. As can be seen from Fig. 3, the thermal stability of *p*-Si<B, Mn> samples significantly improves with increasing concentration of manganese atom nanoclusters. In *p*-Si<B, Mn> samples with the concentration of nanoclusters $N=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ at annealing temperature $T=125 \text{ } ^\circ\text{C}$, the decay is practically not observed, i.e. the samples retain their electro physical parameters. The studies also showed that the NMR and the magnitude of impurity photoconductivity retained their pre-annealing values.

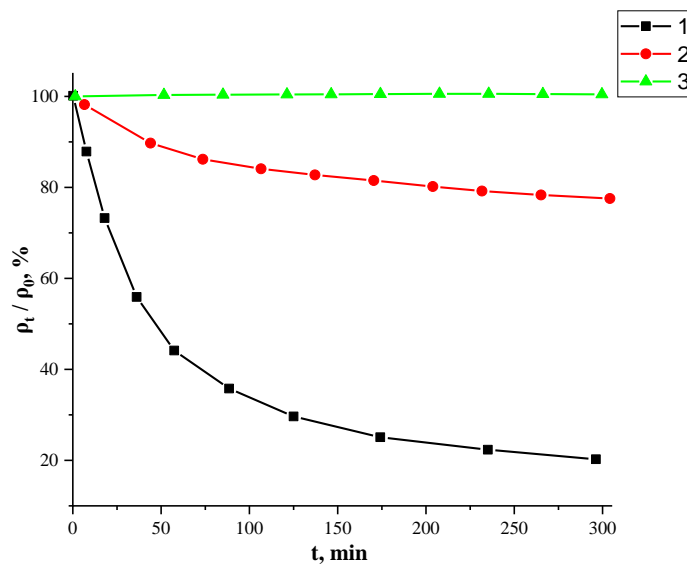


Figure 3. Relative changes in resistivity of *p*-Si<B, Mn> samples with different concentrations of manganese atom nanoclusters at $T=125 \text{ } ^\circ\text{C}$
1) $N_{(\text{Mn})4}=2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 2) $N_{(\text{Mn})4}=5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 3) $N_{(\text{Mn})4}=10^{15} \text{ cm}^{-3}$

Conclusion. The above experimental results related to the study of changes in the properties of silicon with nanoclusters of manganese atoms in times of heat treatment allow us to determine the operating temperature range of photovoltaic and magnetic devices based on the material $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ with nanoclusters. Sufficiently high maximum operating temperatures ($T \geq 100$ °C) allow us to use this material to for receiving a wide range of new electronic devices in the field of spintronics and optoelectronics, as well as various highly sensitive sensors of physical quantities [14] operating both at room temperature and at low temperatures.

REFERENCES:

1. Bakhadir khanov M.K., Ayupov K.S., Mavlyanov G.H., Isamov S.B. Negative magnetoresistance in silicon with manganese-atom complexes $[Mn]_4$. // *Semiconductors*. -2010. -Vol.44. -No.9. -P.1145–1148. <https://doi.org/10.1134/S106378261009006X>
2. Bakhadir khanov M.K., Isamov S.B., Zikrillaev N.F., Iliiev Kh.M., Mavlonov G.H., Koveshnikov S.V., Ibodullaev Sh.N. Functional Capabilities of Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms. // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. -2020. -Vol.60. -No.6. -P.734–739. (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068375520060046>
3. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.Kh., and Iliiev Kh.M. Control of the Magnetic Properties of Silicon with Manganese Atom Nanoclusters. // *Technical Physics*. -2014. -Vol.59. -No.10. -P.1556–1558.
4. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.H., Iliiev X.M., Ayupov K.S., Sattorov O.E., Tachilin S.A. Specific features of magnetoresistance in overcompensated manganese-doped silicon. // *Semiconductors*. -2014. -Vol.48. -No.8. -P.986–988. <https://doi.org/10.1134/S106378261408003X>
5. Bakhadyrkhanov M.K., Ayupov K.S., Mavlyanov G.Kh., Iliiev Kh.M., Isamov S.B. Photoconductivity of silicon with nanoclusters of manganese atoms. // *Russian Microelectronics*. -2014. -Vol.39. -No.6. -P.401–404. <https://doi.org/10.1134/S1063739710060041>
6. Bakhadyrkhanov M.K., Isamov S.B., Zikrillaev N.F. IR Photodetectors in the Range of $\lambda = 1.5\text{--}8$ μm , Based on Silicon with Multicharged Nanoclusters of Manganese Atoms. // *Russian Microelectronics*. -2012. -Vol.41. -No.6. -P.354–356. <https://doi.org/10.1134/S1063739712030043>
7. Bakhadyrkhanov M.K., Boltaks B.I., Kulikov G.S. Diffusion, solubility and electrical properties of manganese in silicon. // *FTT*. -1970. -No.14. -P.1671-1678.
8. Ludwig G.W., Woodbury H.H., Carlson R.O. Spin resonance of deep level impurities in germanium and silicon. // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. -1959. -V.8. -P.490. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90397-X](https://doi.org/10.1016/0022-3697(59)90397-X)
9. Fistul V.I., Kazakova V.M., Bobrovnikov Yu.A., Ryabtsev A.V., Abdurakhmanov K.P., Zainabidinov S., Kamilov T.S., Utamuradova Sh.B. // *SOV PHYS SEMICOND*. -1982. -Vol.16. -No.5. -P.603–605.
10. Kreissl J., Gehlhoff W. Electron Paramagnetic Resonance of the Mn_4 Cluster in Silicon. // *Physica status solidi*. -1988. -Vol.145. -No.2. -P.609–617. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221450227>
11. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.Kh., Isamov S.B., Iliiev Kh.M., Ayupov K.S., Saparniyazova Z.M., and Tachilin S.A. Transport Properties of Silicon Doped with Manganese via Low Temperature Diffusion. // *Inorganic Materials*. -2011. -Vol.47. -No.5. -P.479-483. <https://doi.org/10.1134/S0020168511050062>
12. Abdurakhmanov K.P., Lebedev A.A., Kreysl Y., Utamuradova Sh.B. Deep levels in silicon associated with manganese. // *FTP*. -1985. -Vol.19. -No.2. -P.213-216.
13. Bakhadyrkhanov M.K., Iliyev Kh.M., Mavlonov G.Kh., Ayupov K.S., Isamov S.B. and Tachilin S.A. Silicon with Magnetic Nanoclusters of Manganese Atoms as a New Ferromagnetic Material. // *Technical Physics*. -2019. -Vol.64. -No.3. -P.385–388. <https://doi.org/10.1134/S1063784219030046>
14. Ayupov K.S., Bakhadyrkhanov M.K., Iliiev Kh.M., Mavlonov G.Kh., Tachilin S.A. Multifunctional sensor of physical quantities based on silicon with nanostructures of manganese atoms. // *Pribore*. -2017. -No.4. -P.7-10.

DINAMIKANING ASOSIY MASALALARI: MODDIY NUQTANING DINAMIK HARAKAT QONUNLARINI ANIQLASH USULLARI**Qo‘chqorova Farida Tuychi qizi,**

Qarshi davlat texnika universiteti

Shahrisabz Oziq-ovqat muhandisligi fakulteti

faridaquchqorova16@gmail.com

Mannonova Malika Sarvar qizi,

Toshkent kimyo-texnologiya instituti

Shahrisabz filiali katta o‘qituvchisi

Qarshi davlat texnika universiteti dotsenti (PhD)

mannonovamalika37@gmail.com

Kengboyev Sirojiddin Abrayvich,

Qarshi davlat texnika universiteti assistent o‘qituvchisi

sirojmagistrstudent@gmail.com

Dusanova Gulshod Mirzayevna

Qarshi davlat texnika universiteti o‘qituvchisi

Annotatsiya. Ushbu maqolaning maqsadi dinamik o‘zaro ta’sirlar nazariyasidan olinishi mumkin bo‘lgan harakat qonunlarini va uning ko‘p va muhim ilmiy qo‘llanilishini taqdim etishdir. Bir vaqtning o‘zida koaksiyal bo‘lmagan aylanishlarga duchor bo‘lgan qattiq jismlarning xatti-harakatlarining yangi talqiniga asoslanib, biz ushbu jismlarning dinamik harakati to‘g‘risida gipotezani ishlab chiqdik. Ushbu gipotezalardan va erkin jismlarning kosmosdagi xatti-harakatlarini kuzatish natijasida biz aksiomalar va matematik-fizik modelni ishlab chiqdik. Shunday qilib, biz gipotezalar va kuzatilgan xatti-harakatlarga mos keladigan harakat tenglamasini chiqardik. Ushbu dinamik model, qattiq qattiq jismlar yoki tizimlar holatida, uning dinamik ishlashi bilan bog‘liq bir qator qonunlar va natijalarni ilgari surishga imkon beradi. Bu qonunlar keyinchalik eksperimental sinovlar bilan tasdiqlangan. Ushbu tadqiqotning barchasi biz Dinamik o‘zaro ta’sirlar nazariyasi (TID) deb nomlagan oqilona va kontseptual tuzilmani tashkil qiladi. Ushbu mantiqiy deduktiv tizim aylanish natijasida ko‘p tezlanishga duchor bo‘lgan qattiq jismlarning harakatini bashorat qilish imkonini beradi. Xulosalarda biz printsiplar va aksiomalar, ishlab chiqilgan fizik-matematik model, olingan harakat tenglamasi, chiqarilgan qonunlar va amalga oshirilgan eksperimental testlar o‘rtasida muvofiqlikka erishilganligini ta’kidlaymiz.

Kalit so‘zlar: dinamik o‘zaro ta’sirlar nazariyasi, qattiq jism, koaksial bo‘lmagan aylanish, harakat tenglamasi, matematik-fizik model, dinamik qonunlar, eksperimental sinovlar, tezlanish, gipoteza, aksiomalar tizimi.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ: МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

Аннотация. Цель данной статьи – представить законы движения, которые могут быть выведены из теории динамических взаимодействий, а также её многочисленные и важные научные применения. На основе нового толкования поведения твёрдых тел, одновременно подвергающихся некоаксиальным вращениям, нами выдвинута гипотеза о динамическом движении этих тел. Из этих гипотез и наблюдений за поведением свободных тел в пространстве были разработаны аксиомы и математико-физическая модель. Таким образом, нами выведено уравнение движения, соответствующее гипотезам и наблюдаемому поведению. Данная динамическая модель позволяет сформулировать ряд законов и выводов, связанных с динамическим поведением твёрдых тел или систем. Эти законы впоследствии были подтверждены экспериментальными испытаниями. Всё это исследование представляет собой рациональную и концептуальную структуру, которую мы назвали теорией динамических взаимодействий (ТДВ). Этот логико-дедуктивный подход позволяет предсказывать движение твёрдых тел, испытывающих множественные ускорения в результате вращения. В заключении отмечается, что достигнуто соответствие между принципами и аксиомами, разработанной физико-математической моделью, полученным уравнением движения, выведенными законами и проведёнными экспериментальными проверками.

Ключевые слова: теория динамических взаимодействий, твёрдое тело, некоаксиальное вращение, уравнение движения, математико-физическая модель, динамические законы, экспериментальные испытания, ускорение, гипотеза, система аксиом.

MAIN PROBLEMS OF DYNAMICS: METHODS FOR DETERMINING THE DYNAMIC LAWS OF MOTION OF A MATERIAL POINT

Abstract. The purpose of this article is to present the laws of motion that can be derived from the theory of dynamic interactions and its numerous and significant scientific applications. Based on a new interpretation of the behavior of rigid bodies subjected simultaneously to non-coaxial rotations, we developed a hypothesis about the dynamic motion of these bodies. From these hypotheses and observations of the behavior of free bodies in space, we formulated axioms and a mathematical-physical model. Thus, we derived an equation of motion consistent with the hypotheses and observed behavior. This dynamic model allows the formulation of a series of laws and results related to the dynamic behavior of rigid bodies or systems. These laws were later confirmed by experimental tests. All of this research constitutes a rational and conceptual framework that we have called the Theory of Dynamic Interactions (TDI). This logical and deductive system makes it possible to predict the motion of rigid bodies subjected to multiple accelerations as a result of rotation. In conclusion, we emphasize that consistency has been achieved among the principles and axioms, the developed physical-mathematical model, the derived equation of motion, the formulated laws, and the conducted experimental tests.

Keywords: theory of dynamic interactions, rigid body, non-coaxial rotation, equation of motion, mathematical-physical model, dynamic laws, experimental tests, acceleration, hypothesis, system of axioms.

Kirish. Dinamika nazariy mexanikaning asosiy bo‘limi bo‘lib, unda jismlarning mexanik harakat qonunlari shu harakatni vujudga keltiruvchi kuchlarga bog‘liq holda o‘rganiladi. Mexanikaning asosiy, birlamchi tushunchasi bo‘lgan kuch dinamikada moddiy jismlar harakatini o‘zgartiruvchi ta’siri bilan aniqlanadi. Dinamikada jismlarga o‘zgarimas kuchlardan tashqari miqdori va yo‘nalishi o‘zgaruvchan kuchlar ham ta’sir ko‘rsatishi mumkin deb qaraladi. Kuchlar aktiv, faol yoki passiv, chunonchi, bog‘lanish reaksiya kuchlari bo‘lishi mumkin: Massa jismlarning moddiy miqdor o‘lchovi bo‘lib, dinamikaning asosiy tushunchalaridan biri hisoblanadi. Jismning harakati faqat unga qo‘yilgan kuchgagina bog‘liq bo‘lmay, uning inertligiga ham bog‘liq. Jismning inertligini miqdor jihatdan ifodalovchi fizikaviy kattalik jismning massasi deyiladi. Biz o‘rganayotgan mexanika klassik mexanika bo‘lib, bunda jismning tezligi yorug‘lik tezligidan ancha kichik, uning massasi o‘zgarimas, skalyar va musbat kattalik deb qaraladi. Harakatini o‘rganishda o‘lchamlari ahamiyatga ega bo‘lmagan, lekin massaga ega moddiy jismga moddiy nuqta deyiladi. Moddiy nuqta asl ma’noda, biror jismni anglatgani uchun u shu jismning massasiga teng massaga va shu sababli, jism kabi ta’sirlasha olish xususiyatiga ega bo‘ladi. Moddiy nuqta tushunchasiga binoan, mexanik sistema yoki jism massasi uni tashkil etgan moddiy nuqtalar massalarining yig‘indisi bilan aniqlanadi. Umumiy holda Jismning harakati faqat ushbu moddiy nuqtalar yig‘indisigagina emas, ularning jism bo‘ylab taqsimlanishi (jism shakli)ga ham bog‘liq. Dinamikaning masalasi. Dinamikaning masalasi jismga ta’sir etuvchi kuchlar bilan uning harakatining kinematik xarakteristikalari o‘rtasidagi bog‘lanish qonunlarini aniqlash va bu qonunlarni harakatning xususiy hollariga tatbiq etishdan iborat. Dinamika masalasini dinamikaning asoschisi Nyuton juda yaxshi ta’riflagan. U aytganki, dinamika “harakatning yuz berishiga ko‘ra tabiat kuchlarini bilish, so‘ngra bu kuchlar bilan tabiatning boshqa hodisalarini tushuntirishi” zarur. Albatta, moddiy nuqta dinamikasining asosiy masalalari va harakat qonunlarini aniqlash usullarini batafsilroq va bo‘limlarga bo‘linmasdan yoritaman. Moddiy nuqta dinamikasining asosiy vazifasi - moddiy nuqtaning fazoda vaqt o‘tishi bilan joylashuvining o‘zgarishini, ya’ni uning harakatini sabablari (kuchlar) bilan bog‘liq holda o‘rganishdir. Buning uchun eng asosiy vosita Nyutonning ikkinchi qonuni bo‘lib, u kuch, massa va tezlanish o‘rtasidagi bog‘liqlikni ifodalaydi: $m \cdot a = \Sigma F$. Bu tenglama har qanday dinamik masalaning yechimi uchun asos hisoblanadi.

Asosiy masalalar tahlili. Dinamikada ikki turdagi asosiy masala mavjud. Birinchi masalada moddiy nuqtaning massasi, boshlang‘ich holati (joylashuvi va tezligi) va unga ta’sir etuvchi barcha kuchlar ma’lum bo‘ladi, shu asosda nuqtaning harakat qonuni, ya’ni vaqtning istalgan momentidagi joylashuvi va tezligi topiladi. Bu masalani yechish uchun Nyutonning ikkinchi qonuni asosida harakatning differensial tenglamalari tuziladi va ularning yechimi topiladi. Masalan, Yerga ma’lum burchak ostida otilgan toshning harakat traektoriyasini, maksimal balandligini va uchish masofasini topish. Ikkinchi masalada esa moddiy nuqtaning massasi va uning harakat qonuni ma’lum bo‘ladi, shu asosda unga ta’sir etuvchi kuch(lar) topiladi. Bu masalani yechish nisbatan soddagina, chunki u differensial tenglamalarni integrallashni talab qilmaydi.

Ma'lum bo'lgan harakat qonunidan ketma-ket hosila olish orqali tezlanish topiladi va so'ngra Nyutonning ikkinchi qonuniga asosan kuch topiladi. Masalan, Quyosh atrofida ma'lum bir traektoriya bo'yicha harakatlanayotgan sayyoraga qanday kuch ta'sir qilayotganini topish. Harakat qonunlarini aniqlash usullari Harakat qonunlarini aniqlashning asosiy usuli differensial tenglamalarni tuzish va ularni yechishdir. Bu jarayon moddiy nuqtaning dinamik modelini tuzish, faol kuchlarni aniqlash, qulay koordinatalar sistemasini tanlash, harakat differensial tenglamalarini yozish, differensial tenglamalarni yechish va boshlang'ich shartlardan foydalanish bosqichlaridan iborat. Koordinatalar sistemasini tanlash juda muhim, chunki masalaning shartiga qarab Dekart koordinatalari, tabiiy koordinatalar yoki boshqa sistemalardan foydalanish mumkin. Har bir sistema o'ziga xos tenglamalar sistemasini talab qiladi. Differensial tenglamalarni yechish eng murakkab bosqich bo'lib, turli matematik usullar (ajratuvchi o'zgaruvchili, bir jinsli, chiziqli tenglamalar) qo'llaniladi. Yechimda paydo bo'ladigan integrallash doimiylarini aniqlash uchun boshlang'ich shartlar ($t=0$ dagi joylashuv va tezlik) muhim ahamiyatga ega.

Amaliy qo'llanilishi. Moddiy nuqta dinamikasining ushbu tamoyillari va usullari nafaqat nazariy ahamiyatga ega, balkil amaliyotda ham keng qo'llaniladi. Mashinasozlikda, qurilishda, aviatsiyada, kosmonavtikada, robototexnikada va boshqa sohalarida har qanday jismning harakatini hisoblash va loyihalash uchun dinamikaning asosiy tamoyillari qo'llaniladi. Masalan, avtomobilning turli yo'l sharoitlarida harakatini modellashtirish, sun'iy yo'ldoshlarning orbitadagi harakatini hisoblash, turbinalarning aylanish dinamikasini tadqiq qilish – bularning barchasi moddiy nuqta dinamikasiga asoslanadi. Dinamika – bu jismlarning harakat sabablarini o'rganuvchi mexanika bo'limi. Nyutonning uchta asosiy qonuni dinamikaning poydevoridir. Birinchi qonun - inersiya qonuni: agar jismga tashqi kuch ta'sir etmasa, u tinch holatda yoki to'g'ri chiziq bo'yicha bir jinsli harakatda bo'ladi. Ikkinchi qonun - asosiy dinamika qonuni: kuch jism massasi va tezlanishi ko'paytmasiga teng ($F = m \cdot a$). Uchinchi qonun – ta'sir-qarshilik qonuni: har qanday kuchga unga teng va qarama-qarshi yo'nalgan kuch javob qaytaradi. Moddiy nuqta - bu o'lchamlari e'tiborga olinmaydigan, lekin massasi va inersiyasi saqlanadigan ideal jism. Dinamikada ikki turdagi asosiy masala mavjud: to'g'ri masala va teskari masala. To'g'ri masalada kuchlar ma'lum bo'ladi, harakatni topish kerak. Teskari masalada harakat ma'lum bo'ladi, kuchlarni topish kerak. Kuchlar turlari orasida og'irlik kuchi ($P = mg$), elastiklik kuchi ($F = -kx$), ishqalanish kuchi ($F = \mu N$), markazga intiluvchi kuch ($F = mv^2/r$) muhim ahamiyatga ega. Energiya turlaridan kinetik energiya ($E_k = mv^2/2$) harakat energiyasi, potensial energiya ($E_p = mgh$) esa joylashuv energiyasidir. Impuls - harakat miqdori ($p = mv$), impuls momenti - aylana harakati miqdori ($L = r \times p$). Impulsning saqlanish qonuni yopiq sistemada impuls o'zgarimasligini bildiradi. Koordinata sistemalari orasida Dekart sistemasi (x, y, z) va tabiiy sistema (τ, n, b) keng qo'llaniladi. Tabiiy sistemada normal tezlanish $a_n = v^2/\rho$ formulasi bilan hisoblanadi. Bog'lanishlar dinamikasida g'ayritabiiy va tabiiy bog'lanishlar farqlanadi. Harakat tenglamalari differensial shaklda ifodalanadi va turli koordinata sistemalarida yechiladi. Sonli usullardan Eyler usuli ($y_{n+1} = y_n + h \cdot f(x_n, y_n)$), Runge-Kutta usuli, Verlet algoritmi keng qo'llaniladi. Bu usullar kompyuter modellashtirishda muhim ahamiyatga ega. Dinamika qonunlari amaliyotda keng qo'llaniladi: kosmonavtikada orbital hisoblar, mashinasozlikda transport vositalari dinamikasi, qurilishda konstruksiyalar hisobi, robototexnikada harakatni boshqarish, sportda qurilmalar loyihalash. Barcha mexanik hodisalar dinamika qonunlari asosida tushuntiriladi va hisoblanadi. Dinamika - mexanikaning jismlarning harakat sabablarini o'rganadigan bo'limi bo'lib, Nyutonning uch qonuniga asoslanadi. Birinchi qonun - inersiya qonuni: tashqi kuch ta'sir etmasa jism tinch holatda yoki bir jinsli harakatda bo'ladi. Ikkinchi qonun - asosiy dinamika qonuni: $F = m \cdot a$ (kuch massaning tezlanishiga teng). Uchinchi qonun - ta'sir-qarshilik: $F_{12} = -F_{21}$. Moddiy nuqta - o'lchamsiz lekin massali ideal jism. Dinamikada ikkita asosiy masala mavjud: to'g'ri masala (kuch ma'lum, harakat topiladi) va teskari masala (harakat ma'lum, kuch topiladi). Kuch turlari: og'irlik ($P = mg$), elastiklik ($F = -kx$), ishqalanish ($F = \mu N$), markazga intiluvchi ($F = mv^2/r$). Energiya: kinetik ($E_k = mv^2/2$), potensial ($E_p = mgh$), mexanik ish ($A = F \cdot s$). Impuls - harakat miqdori ($p = mv$), impuls momenti ($L = r \times p$), impulsning saqlanish qonuni. Koordinata sistemalari: Dekart (x, y, z), tabiiy (τ, n, b), normal tezlanish $a_n = v^2/\rho$. Bog'lanishlar: g'ayritabiiy (tezlikka bog'liq) va tabiiy (tezlikka bog'liq emas). Harakat tenglamalari differensial shaklda: $d^2x/dt^2 = F_x/m$. Sonli usullar: Eyler ($y_{n+1} = y_n + h \cdot f(x_n, y_n)$), Runge-Kutta, Verlet. Amaliy qo'llanilish: orbital hisoblar, transport dinamikasi, qurilish konstruksiyalari, robototexnika, sport qurilmalari. Dinamik tizimlar: erkin (cheklovsiz) va bog'langan (cheklovli). Differensial tenglamalarni yechish usullari: analitik (aniQ) va sonli (taxminiy). Fazoviy yondashuv – harakatni fazo-tezlik koordinatalarida tahlil qilish. Dinamikaning universal tamoyillari: D'Alamber printsiipi (dinamikani statikaga keltirish) va kamimalik printsiipi (minimal harakat). Qattiq jismlar dinamikasi moddiy nuqta dinamikasiga asoslanadi. Muhim tushunchalar: massa markazi, inersiya momenti, aylanish dinamikasi. Bog'lanish reaksiyalari: $N = mg \cos \alpha$. Tezlanish: tangensial ($a_t = dv/dt$) va normal ($a_n = v^2/\rho$). Kuchlar qo'shilishi: vektor qoidasi bo'yicha. Nyuton qonunlari inertial sanoq sistemalarida o'rinni.

Dinamika tarixi. Arximed, Galiley, Nyuton, Eyler, Laplas, Lagranj, Gamilton. Zamonaviy qo'llanilish: kosmik apparatlar, samolyotlar, avtomobillar, robotlar, qurilish mexanizmlari. Matematik asoslar: differensial hisob, vektor analizi, variatsion hisob. Eksperimental dinamika: tezlanish o'lchash, kuch o'lchash, tezlik o'lchash. Ushbu tahlil orqali biz doimiy aylanish va orbital harakat o'rtasidagi dastlabki aporiyamizga (muammoli savolga) to'liq javob berganimizga ishonamiz. Shu bilan biz tabiatda jismlarning ayni vaqtda aylanishi va orbitada harakatlanishini ularning massaning o'ziga xos inertsiya xatti-harakati bilan izohlab beramiz. Butun bayonot davomida biz "inertsiya kuchi" tushunchasidan qochishga, uning o'rniga inertsiya reaksiyasi tushunchasini kiritishga harakat qildik. Moddani kuzatish orqali haqiqiy kuchlarning mavjudligini isbotlab bo'lmaydi. Ammo biz tezliklarning notekis taqsimlanishini kuzatishimiz mumkin, ularning hosilalari (derivativlari) natijasida inertsiya tezlanish maydoni hosil bo'ladi. Bu maydon bir jinsli emas, ammo uni inertsiya kuchlari maydoni sifatida talqin qilish mumkin. Ta'kidlash lozimki, bu inertsiya kuchlari maydoni boshqa dinamik nazariyalarda bo'lgani kabi koordinatalar o'qini almashtirish natijasida hosil bo'lmaydi. Aksincha, u qattiq jism ichida, unga berilgan tashqi qo'zg'atuvchi ta'sir (moment) natijasida inertsiya reaksiyasi sifatida paydo bo'ladi. Bizning deduktiv tahlilimizda, jismning tekis harakati (translyatsiyasi) holatida ajratib ko'rsatuvchi gipoteza kiritilgan — ya'ni, translatsiya tezliklari maydoni ikkinchi, o'qlar bir-biriga to'g'ri kelmaydigan moment (non-koaksial moment) ta'sirida hosil bo'lgan anizotrop inertsiya tezliklari maydoniga ulanadi. Natijada, harakatlanuvchi jismning dastlabki ichki aylanishi bilan bir vaqtda orbital harakat hosil bo'ladi. Ushbu yangi orbital harakat doimiy modulga ega bo'lgan translatsion tezlik vektori aylanishi bilan aniqlanadi. Avvalgi ishlarimizda biz ushbu tahlil yordamida fazodagi har qanday harakatning tabiatini aniqlash va uning nisbiyligini belgilash mumkinligini taklif qilganmiz. Taklif etilgan harakat tenglamasi va formulalangan qonunlar bizga ratsional mexanika va aylanma dinamikani — aylanish orqali tezlanayotgan jismlar uchun — asoslar va aksiomalar asosida tuzish imkonini beradi. Ushbu yangi ratsional tuzilma ichida klassik mexanikadagi g'ayrioddiy yoki ziddiyatli hodisalar, masalan, girokopik moment yoki soxta kuchlar, paydo bo'lmasligi kerak. Dinamik o'zaro ta'sirlar nazariyasi (Theory of Dynamic Interactions) — bu ba'zi dinamik gipotezalardan tashkil topgan mantiqiy-deduktiv tizimdir. U tabiatni kuzatish, dastlabki gipotezalarni shakllantirish va aksiomalar hamda postulatlardan kelib chiqish orqali aylanma tezlanishlarga duchor bo'lgan qattiq jismlarga doir bilimlar tuzilmasini yaratadi. Natijada olingan fizik-matematik model ketma-ket, o'qlari bir-biriga mos kelmaydigan momentlar ta'sirida bo'lgan jismlarning kuzatiladigan xatti-harakatlarini izohlash, shuningdek, yangi xulosalar, mantiqiy natijalar va bashoratlar chiqarish imkonini beradi. Ushbu nazariya eksperimental sinovlar bilan tekshirilgan va tasdiqlangan. Mazkur matn Nyuton qonunlariga qarshi chiqishni maqsad qilmaydi; aksincha, u aylanish orqali tezlanayotgan tizimlar uchun klassik mexanikaga qo'shimcha konseptual tuzilma sifatida ishlab chiqilgan. Biz translatsion klassik mexanika qonunlari amal qilmaydigan, no-inertsiya muhitlari uchun maxsus aylanish algebrasiga asoslangan nazariyani taklif qilamiz. Shu tariqa, biz koinotda tez-tez uchrab turadigan, ammo bejizga e'tibordan chetda qolgan ayrim maxsus dinamik holatlar uchun yangi bilim sohasini tadqiq etishni taklif qilamiz. Shuningdek, ushbu tadqiqotlar rivoji davomida boshlang'ich gipotezalar, qo'llanilgan prinsipl va aksiomalar, yaratilgan fizik-matematik model, olingan harakat tenglamasi, chiqarilgan qonunlar, yaratilgan modellashtirish (simulyatsiya) modellari hamda o'tkazilgan tajribaviy sinovlar o'rtasida to'liq mantiqiy uyg'unlik (moslik) ta'minlangani alohida ta'kidlashga arziydi. Shuningdek, biz tabiatda kuzatilgan misollarni ham keltirib o'tdik — ular Dinamik o'zaro ta'sirlar nazariyasini (Theory of Dynamic Interactions) qo'llab-quvvatlaydi va ushbu matnda bayon etilgan qonunlarning to'g'riligini tasdiqlaydi.

Xulosa. Dinamika nazariyasi fizikaning eng fundamental bo'limlaridan biri bo'lib, moddiy jismlarning harakat sabablarini va ularning o'zgarish qonuniyatlarini o'rganadi. Nyutonning klassik mexanika qonunlari dinamikaning asosini tashkil etadi, ulardan eng muhimi $F = ma$ formulasi bilan ifodalanadigan ikkinchi qonundir. Bu tenglama kuch, massa va tezlanish o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlab, har qanday moddiy nuqta harakatini tavsiflash imkonini beradi. Dinamikaning asosiy masalalarini ikki guruhga ajratish mumkin: birinchisida kuchlar ma'lum bo'lganda harakatni aniqlash, ikkinchisida esa harakat ma'lum bo'lganda kuchlarni topish. Harakatning differensial tenglamalari dinamik masalalarni yechishning asosiy vositasi bo'lib, ularning yechimi jismning traektoriyasi va tezligini to'liq aniqlaydi. Energiyaning saqlanish qonuni, impulsning saqlanishi va impuls momentining saqlanishi kabi universal qonunlar murakkab sistemalarni tahlil qilishda qo'llaniladi. Koordinatalar sistemalarining turli turlari - Dekart, sferik, silindrik va tabiiy koordinatalar - masalaning shartiga qarab qulaylik yaratadi. Zamonaviy dinamika klassik chegaralardan chiqib, relyativistik dinamika va kvant dinamikasini qamrab olgan holda rivojlanmoqda. Amaliyotda dinamika qonunlari kosmik apparatlarning orbital harakatini hisoblash, qurilish konstruksiyalarining mustahkamligini aniqlash, transport vositalarining harakatini loyihalash va robototexnika sistemalarini boshqarishda keng qo'llaniladi. Eksperimental dinamika esa turli o'lchov usullari

PHYSICS

- dinamometrlar, akselerometrlar, tezlik va traektoriya o'lganlar orqali nazariy qonunlarni tasdiqlaydi. Dinamikaning rivojlanishi Galileo, Nyuton, Eylar, Laplas, Lagranj va Gamilton kabi olimlarning ishlari natijasida sodir bo'ldi va bugungi kunda u nafaqat makroskopik jismlar, balki molekulyar va atom darajasidagi sistemalarni ham o'rganish imkonini beradi.

ADABIYOTLAR:

1. *Classical Mechanics (3rd Edition)* by Tai L. Chow. Routledge. Link: <https://www.routledge.com/Classical-Mechanics-Chow/p/book/9781032789545> Routledge
2. *Classical Mechanics: Systems of Particles and Hamiltonian Dynamics* by Walter Greiner. Springer-Verlag. Link: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03434-3> SpringerLink
3. *Classical Mechanics: An Introduction* by Dieter Strauch. Springer. Link: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73616-5>
4. *Classical Mechanics: From Particles to Continua and Regularity to Chaos* – Authors: Govind S. Krishnaswami. Havola: SpringerLink SpringerLink
5. *Theoretical Physics Compact I: Classical Mechanics* – Author: Wolfgang Cassing. Havola: SpringerLink SpringerLink
6. *Classical Mechanics: Including an Introduction to the Theory of Elasticity* – Author: Reinhard Hentschke. Havola: SpringerLink SpringerLink
7. *Introduction to Dynamics* – Authors: Friedrich Pfeiffer & Thorsten Schindler. Havola: SpringerLink SpringerLink
8. *Engineering Dynamics 2.0: Fundamentals and Numerical Solutions* – Author: Lester W. Schmerr. Havola: SpringerLink

ARTEZIAN QUDUQ SUVI TARKIBIDAGI TABIIY (^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) VA
TEXNOGEN ^{137}Cs IZOTOPLARINING MIQDORI**Qodirov Mumin Qodirovich,**Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti
Yadro fizikasi va astronomiya kafedراسi professori
qodirov1946@gmail.com**Tuxtayev Ulug‘bek Uktamovich,**Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti
Yadro fizikasi va astronomiya kafedراسi dotsenti
ulugbekuktamovich89@gmail.com**Muxammedov Aliakbar Kurbanovich,**Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti
Yadro fizikasi laboratoriyasi katta ilmiy xodimi
mukhammedov59@gmail.com**Ulasheva Mashhura Akram qizi,**Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti
Yadro fizikasi va astronomiya kafedراسi magistranti
ulashevam2002@gmail.com**Nabiyev Abdullo Abduvohidovich,**Samarqand davlat tibbiyot universiteti Informatcion
texnologiya, biofizika va tibbiy fizika kafedراسi assistenti
tojik.sam@gmail.com

Annotatsiya. Mazkur maqolada Samarqand Davlat Universiteti Yadro Fizikasi laboratoriyasi hududida joylashgan artезian quduq suv namunasining tarkibidagi tabiiy (^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) hamda texnogen ^{137}Cs radioaktiv izotoplarning konsentrasiyasi NaI(Tl) kristalli ssintillatsion gamma-spektrometr usuli yordamida yordamida o‘rganildi. Suv namunasining harorati, pH ko‘rsatgich darajasi, qattiqligi va elektr o‘tkazuvchanligi o‘lchanildi. O‘ranilgan suv tarkibida uran, toriy qatoriga mansub radioaktiv elementlarning konsentrasiyasi Sanitariya-epidemiologik osoyishtalik va jamoat salomatligi xizmati (SanPiN) belgilab qo‘yilgan chegaraviy qiymatdan oshmaganligi aniqlandi. Tekshirilgan suvlarda radiy - 226 ning α -yemirilishidan hosil bo‘ladigan radon -222 solishtirma aktivligi aniqlandi. Olingan natijalar ekologik xavfsizlik nuqtai nazaridan tahlil qilindi.

Kalit so‘zlar: radioaktivlik, izotop, suv, uran (^{238}U), toriy (^{232}Th), radiy (^{226}Ra), radon (^{222}Rn), ssintillyasiya, gamma-spektrometr.

СОДЕРЖАНИЕ ПРИРОДНЫХ (^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) И ТЕХНОГЕННОГО ^{137}Cs
ИЗОТОПОВ В АРТЕЗИАНСКОЙ ВОДЕ

Аннотация. В данной статье исследован состав пробы артезианской воды, взятой с территории лаборатории ядерной физики Самаркандского государственного университета, на содержание природных (^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) и техногенного ^{137}Cs радиоактивных изотопов методом сцинтилляционной гамма-спектрометрии с использованием кристалла NaI(Tl). Были измерены температура воды, показатель pH, жёсткость и электрическая проводимость. Установлено, что концентрации радиоактивных элементов уранового и ториевого рядов в исследуемой воде не превышают предельно допустимых значений, установленных Службой санитарно-эпидемиологического благополучия и общественного здоровья (СанПиН). Также определена удельная активность радона-222, образующегося при α -распаде радия-226. Полученные результаты проанализированы с точки зрения экологической безопасности.

Ключевые слова: радиоактивность, изотоп, вода, уран (^{238}U), торий (^{232}Th), радий (^{226}Ra), радон (^{222}Rn), сцинтилляция, гамма-спектрометр.

CONCENTRATION OF NATURAL (^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) AND ANTHROPOGENIC ^{137}Cs
ISOTOPES IN ARTESIAN WATER

Abstract. In this article, the composition of an artesian water sample collected from the territory of the Nuclear Physics Laboratory of Samarkand State University was studied to determine the concentrations of

natural (^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) and anthropogenic ^{137}Cs radioactive isotopes using a $\text{NaI}(\text{Tl})$ crystal scintillation gamma spectrometer. The temperature, pH level, hardness, and electrical conductivity of the water sample were measured. It was found that the concentrations of radioactive elements belonging to the uranium and thorium series did not exceed the permissible limits established by the Sanitary and Epidemiological Safety and Public Health Service (SanPiN). The specific activity of radon-222 resulting from the α -decay of radium-226 was also determined. The obtained results were analyzed from the perspective of environmental safety.

Key words: radioactivity, isotope, water, uranium (^{238}U), thorium (^{232}Th), radium (^{226}Ra), radon (^{222}Rn), scintillation, gamma spectrometer.

Kirish. Radioaktiv elementlarning asosiy massasi tog' jinslarida, ayniqsa, magmatik jinslarda to'plangan. Shamollar, suvlar, temperatura va boshqa tabiat reagentlari ta'sirida tog' jinslari yemiriladi. Tog' jinslari yemirilganda Yer sirtida uran (^{238}U) va toriy (^{232}Th) ajralishi paydo bo'ladi. Toriy (^{232}Th) minerallari tabiat suvlarida uran (^{238}U)ga nisbatan juda kuchsiz eriydi. Shuning uchun toriy (^{232}Th) tabiat suvlarida kichik miqdorda aniqlanadi. Dengiz suvlarida o'rtacha $2\cdot 10^{-9}$ % atrofida bo'ladi [3]. Uranning katta qismi eritmalar hosil qilib, ko'l, dengiz, okean suvlariga o'tadi va suvlarda erigan holda bo'ladi, qisman suvlar tagidagi cho'kmalarga o'tadi. Dengiz va okean suvlarida uran (^{238}U) miqdori deyarli doimiy bo'lib, $2\cdot 10^{-6}$ g/l ga yaqin bo'ladi. Ayrim ko'l suvlarida uran (^{238}U) miqdori dengiz suvlaridagiga nisbatan bir necha o'n marta katta bo'lishi aniqlangan. Ariq suvlarida uran (^{238}U) miqdori o'rtacha 10^{-6} - 10^{-7} g/l ni tashkil qiladi. Tog' jinslari orasidan yoki uranli qazilmalar bo'lgan hududlardan oqib o'tadigan ariq suvlarida uran katta miqdorda ($1\cdot 10^{-5}$ g/l) uchraydi. Buning sababi uranning katta miqdori (ba'zan $1\cdot 10^{-3}$ g/l ga yetadi) bilan karakterlanadigan yer osti suvlari bo'lib, ariq suvlariga ham o'z hissasini qo'shishidir [1, 2].

Suvlarning radioaktivligiga, ayniqsa, yer osti suvlarining radioaktivligiga radon (^{222}Rn) ahamiyatli darajada hissa qo'shadi. Radon (^{222}Rn) miqdorini bilgan holda suv tarkibidagi uran, radiy va ular yemirilishidan hosil bo'ladigan radioaktiv izotoplar miqdori, suvning radioaktivligi darajasi haqida ma'lumot olish mumkin. Suv, havo, oziq-ovqatlar orqali kishilar organizmiga o'tgan radioaktiv izotoplar yarim yemirilish davriga, organizmdan chiqarilish darajasiga bog'liq ravishda ichki nurlanish manbayi bo'lib qoladi. Kishilar yashash faoliyati davomida oladigan nurlanishlarning asosiy qismini tabiiy radionuklidlar yemirilishidan hosil bo'ladigan tabiiy radioaktiv nurlanishlardan oladi [3]. Kishilar oladigan nurlanish xavfsiz deb belgilangan chegaraviy miqdoridan ortib ketgan hollarda sog'lom organizmda patologik jarayonlar paydo bo'ladi. Hayot uchun xavfli bo'lgan turli xil kasalliklar, ya'ni saraton, bepustlik, nasl, teri kasalliklari kelib chiqishiga sabab bo'ladi. Shuning uchun tabiat namunalari (suv, havo, o'simlik)ning radioaktivlik darajasini, uning o'zgarishini doimiy ravishda nazorat qilib borish kishilar sog'lig'ini muhofaza qilishda ekologik nuqtai nazardan muhim ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2025-yil 30-yanvardagi PF-16-son Farmoni bilan tasdiqlangan "O'zbekiston – 2030" strategiyasini "Atrof-muhitni asrash" va "Yashil iqtisodiyot" yilida amalga oshirishga oid davlat dasturi mamlakatimizda atrof-muhit muhofazasi va ekologik masalalar davlat siyosatining ustuvor yo'nalishiga aylanganini ifoda etish bilan birga, O'zbekistonda global ekologik tahdidlarga qarshi kurashishning o'ziga xos platformasi yaratilayotganidan darak beradi. Shu nuqtai nazardan, bugungi kunda suvlarning radioaktiv iflaslanganlik darajasini tekshirish, ichimlik suvlaridagi radionuklidlar miqdori belgilangan talab darajasida ekanligini aniqlash ham bugunning ahamiyatli vazifalaridan biridir. O'zbekiston Respublikasi hududida, xususan Samarqand viloyatida yerosti suvlaridan ichimlik suvi sifatida keng foydalaniladi. Bu suv manbalarining radioaktiv ifloslanishi darajasini aniqlash, aholining sog'lig'i uchun muhim ahamiyatga ega. Shu maqsadda, Yadro fizikasi laboratoriyasi hududida joylashgan artezian quduqdan olingan suv namunasi gamma-spektrometrik hamda radiometrik usulda tekshirildi.

O'lchash uslubining nazariyasi va qurilmasining tavsifi. Namunalarni tayyorlash. Suv namunalari Yadro fizikasi laboratoriyasi artesian quduq suvi namunasi 10 litr miqdorda olingan. Suv namunasi polietilin idishda (namuna nomi, namuna olingan joy, olingan vaqti va idish qadoqlangan vaqti) yozib olinadi. Olingan suv namunasi bir joydan ^{222}Rn uchun alohida va TRN va texnogen ^{137}Cs uchun alohida idishda olinadi va qadoqlanadi.

Tekshiriluvchi suvda radionuklidlarning konsentratsiyasi juda kichikligi sababli suv namunalari radionuklidlar aktivligini to'g'ridan - to'g'ri aniqlash samarasiz hisoblanadi. Qo'llaniluvchi usullar qurilmalar sezgirligiga bog'liq bo'lib, o'lchash aniqligini oshirish uchun bug'latish yo'li bilan 1:100-1:1000 proporsiyada namuna konsentratsiyasi oshiriladi [4].

Ichimlik suvining radiatsion xavfsizligi bo'yicha qabul qilingan xalqaro normalarga asosan, aholining ichki nurlanish effektiv dozasi ichimlik suvi iste'moli (730 l/yil) ga bog'liq holda 0,1 mZv/yildan oshmasligi

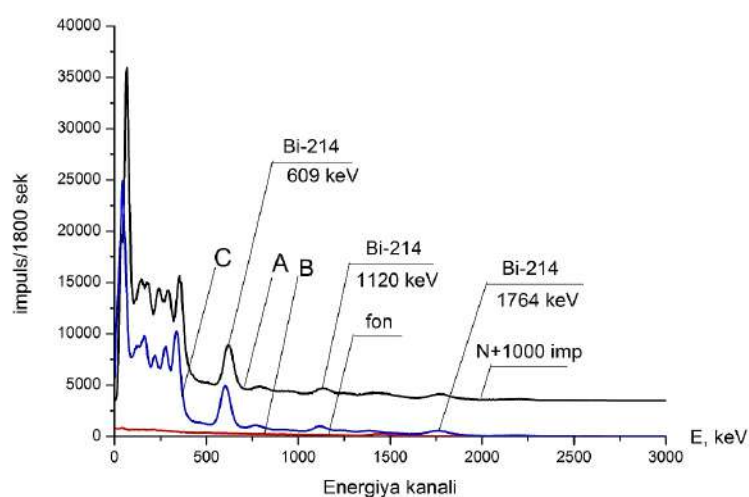
kerak. Shuningdek, ichimlik suvining α -aktivligi 0,5 Bk/l, yig'indi β -aktivligi esa 1 Bk/l dan oshmasligi lozim. Agar bu talablar bajarilsa, boshqa tadqiqotlarni o'tkazish zarurati qolmaydi. Yuqori mineralizatsiyali suvlarning radioaktivligi ularda uchrashi mumkin bo'lgan ^{226}Ra va ^{238}U izotoplari bilan bog'liq. Suvda radiy va uran miqdorini aniqlashda keng foydalaniladigan usullar α -spektrometrik usuli hisoblanadi. Bu usul qimmatbaho qurilmalarning mavjudligi va qiyin elektrokimyoviy cho'ktirish jarayonini talab qiladi. Suvda radiy aniqlashda bajariladigan ancha oddiy usul γ -spektrometrik usuldir. Bunga radiy-bariy sulfati bilan birgalikda cho'ktiriladi. Usulning kamchiligi shundan iboratki, cho'lkmani radiyning yemirilishidan hosil bo'lgan elementlar bilan radioaktiv muvozanatga erishguncha saqlash zarurati hisoblanadi. Chunki, radiy bilan birgalikda uran ham cho'kadi va ^{235}U ning γ -chizig'i 185,7 keV bilan ^{226}Ra ning γ -chizig'i 186,2 keV ustma-ust tushadi. Bu esa chiziq bo'yicha radiy aktivligini aniqlash imkonini bermaydi, shuning uchun radiy va uranni elektrokimyoviy ajratishga asoslangan namuna tayyorlash usullaridan foydalaniladi.

Suvda radonning konsentratsiyasini aniqlash suvni yuzaga chiqarish joyi yaqinidan namuna olish zarur. Suv avval toza yuvilgan shisha idishda olinadi. Suvni olayotganda idishga gaz pufakchalarining tushmasligini kuzatish zarur. Suvni idish liq to'lguncha olish va idish og'zini mahkam yopish kerak. Sababi, radon gazi suvdan kuchli ajraladi. ^{222}Rn aktivligini aniqlash maqsadida olingan suv namunasini olish vaqti va o'lchash vaqti oralig'i ikki kundan $T_{1/2}(^{222}\text{Rn}) = 3,8$ kun) oshmasligi lozim.

Gamma-spektrometriya usullari qo'llanilganda tekshiriluvchi suv namuna olingan shisha idishdan ingichka polietilin (kembrik) shlang nay ($\varnothing 5$ mm) yordamida Marinelli idishi devori bo'ylab quyiladi. Idishning belgilangan chizig'igacha olinib, idish mustahkam qilib yopiladi va o'lchash namunasi sifatida ishlatiladi. O'lchash uchun tayyorlangan namunalarda o'lchami $\varnothing 80 \times 80$ mm NaI(Tl) kristalli ssintillyatsion γ -spektrometrda 1800 sek davomida aktivligi tekshiriladi. Spektrometr ^{137}Cs ning 661 keV li monoenergetik γ -chizig'i uchun energetik ajrata olish qobiliyati 8,5% ni tashkil qiladi. Spektrometr standart ^{232}Th radionuklidi yordamida energiya bo'yicha gradiurovka qilingan. Namunalarni o'lchash davomida operator laboratoriya xonasi havosi harorati va nisbiy namligi bir xil sharoitda o'lchanmog'i lozim.

Gamma-spektrometрни tashkil etuvchilarga ajratish (2-rasm) va qayta ishlash [5] metodika (usullar) yordamida amalga oshiriladi. Eksperimental spektrdan radon tashkil etuvchisi – P spektrlar farqi bo'yicha ajratiladi:

- tekshiruvchi – A va distirlangan (inert) – B hamda suv namunalari – C γ -spektri (1-rasmga qarang);
- $\Delta t = T_{1/2}(^{222}\text{Rn}) = 3,83$ kun saqlangandan so'ng o'lchash namunasi spektri;
- namunadagi ^{222}Rn aktivligi uning spektridan faqatgina 185,6 keV li γ -chizig'i mavjudligi sababli, farqlanuvchi ajratilgan tashkil etuvchisini P – etalon manba ^{226}Ra – E spektri bilan taqqoslash natijasida aniqlanadi.

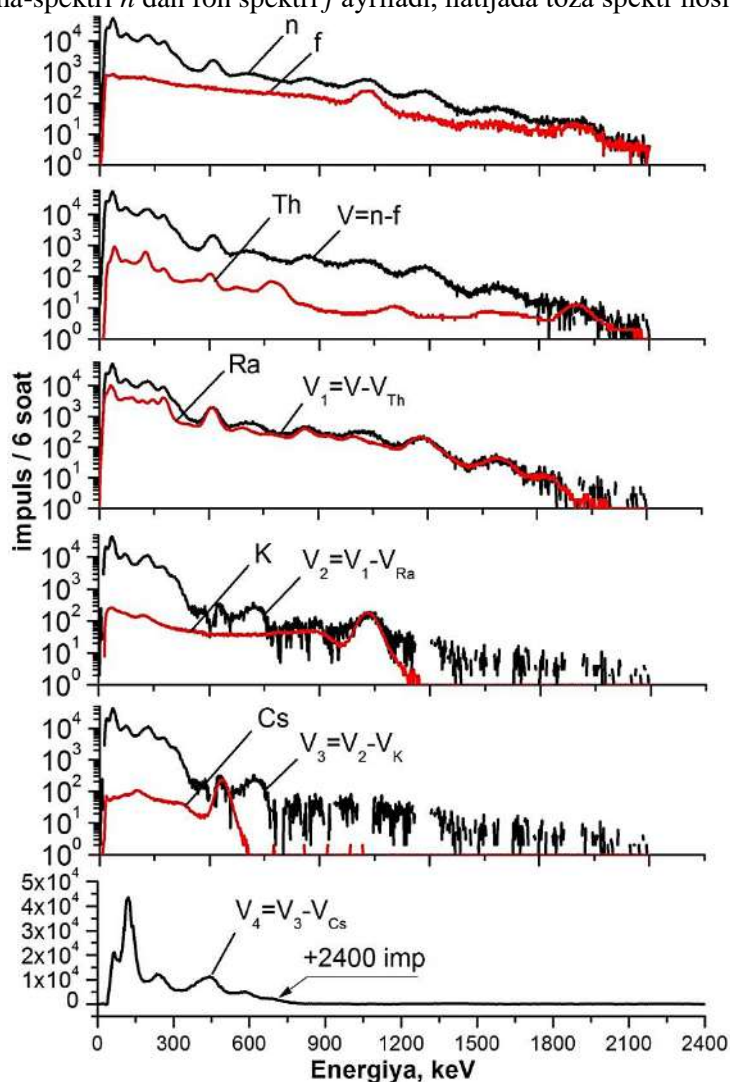


1-rasm. Suv namunasining γ -spektri (tekshiruvchi – A , distirlangan (inert) – B hamda suv namunalari – C γ -spektri ^{222}Rn tashkil etuvchisi)

Suv namunasi tarkibidagi uran (^{235}U) γ -spektrometrik aniqlashda quyidagilar bajariladi:

- olingan suv namunasi 10 dm³ miqdorda, bunday suv miqdorini 1 dm³ Marinelli idishi hajmigacha 70°C haroratda bug'lantiriladi;
- γ -spektrometrda namunani 6 soat davomida γ -spektri o'lchanadi hamda sof spektrni aniqlash uchun 6 soatlik ekspozitsiya vaqti bilan o'lchangan distirlangan suv spektri V ayriladi (2-rasm);

- suv tarkibidagi TRN ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , texnogen ^{137}Cs larning miqdori etalon OMACH (standart) manbalarning spektrlari bilan normallashtirib hisoblanadi. Etalon OMACH manbalari 3 xil zichlikda spektrlari 6 soat davomida o'lchab olinadi va o'lchangan spektrlar dasturiy ta'minot bazasiga joylashtiriladi;
- fon spektri sifatida quritilgan NaCl (osh tuzi) Marinelli idishiga solinib 6 soat davomida γ -spektri o'lchab olinadi;
- namunaning gamma-spektri n dan fon spektri f ayriladi, natijada toza spektr hosil bo'ladi $V = n - f$;



2-rasm. Suv namunasi γ -spektrlarini TRN tashkil etuvchilarga ajratish

- toza gamma-spektr tarkibida TRN (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) va ^{235}U va texnogen ^{137}Cs , mavjud. Namunalarning fondan tozalangan spektr tarkibidagi ^{232}Th radionuklididan hosil bo'ladigan barcha gamma-chiziqlarni zichligiga (massaga) tuzatma koeffitsiyent k ga ($k = m_{et} / m_0$) ko'paytirib spektr zichlik bo'yicha normallashtiriladi, keyin normallashtirilgan etalon va namuna spektrlaridagi ^{232}Th ning 2614 keV li fotocho'qqilari yuzalari S_0 , S_{et} topiladi, shu spektr yuzalari nisbati ($\alpha = S_{et}/S_0$) etalon manba hosil qilgan spektrga ko'paytirib normallashtiriladi;

- namuna spektri V dan normallashtirilgan ^{232}Th spektri V_{Th} ayriladi $V_1 = V - V_{Th}$, natijada namuna spektridan ^{232}Th ga tegishli barcha γ -chiziqlardan tozalanadi;

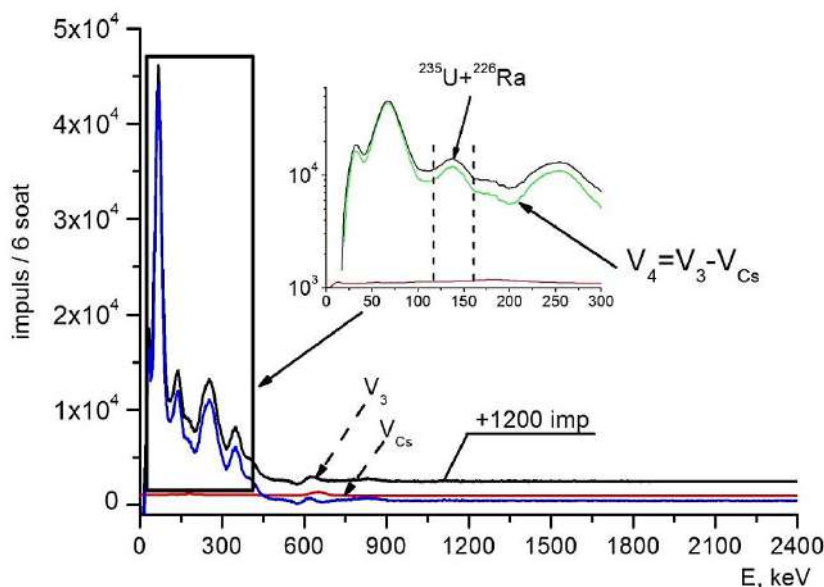
- har bir etalon (OMACH) manbai uchun yuqorida keltirilgandek, zichlik tuzatma koeffitsiyenti topiladi va spektrlar zichlik bo'yicha normallashtiriladi;

- zichlik bo'yicha normallashtirilgan ^{226}Ra etalon va namuna V spektridagi 1764 keV li fotocho'qqilar yuzalari hisoblab topiladi, shu spektrlar yuzalari nisbati ($\alpha = S_{et}/S_0$) etalon manba (^{226}Ra) hosil qilgan spektrga ko'paytirib normallashtiriladi - V_{Ra} ;

- ^{232}Th dan tozalangan namuna spektridan V_1 normallashtirilgan V_{Ra} γ -spektri ayriladi $V_2 = V_1 - V_{Ra}$, natijada namuna spektridan ^{226}Ra ga tegishi barcha chiziqlardan tozalanadi;

- zichlik bo'yicha normallashtirilgan ^{40}K etalon va namuna spektridagi 1460 keV li fotocho'qqilar yuzalarini hisoblab, ularning nisbatini ($\alpha = S_{et}/S_0$) etalon manba (^{40}K) hosil qilgan γ -spektrga ko'paytirilib normallashtiriladi - V_K ;

- ^{226}Ra dan tozalangan namuna spektridan – V_2 normallash V_K γ -spektri ayriladi $V_3 = V_2 - V_K$, natijada namuna spektridan ^{40}K ga tegishli barcha chiziqlardan tozalanadi;
- zichlik bo'yicha normallashgan ^{137}Cs etalon va namuna V spektridagi 661 keV li fotocho'qqilar yuzalari hisoblab, ularning nisbati ($\alpha = S_{et}/S_0$) etalon manba (^{137}Cs) hosil qilgan γ -spektrda ko'paytirilib normallashtiriladi – V_{Cs} ;
- ^{40}K dan tozalangan namuna spektridan – V_3 , normallashgan – V_{Cs} γ -spektri ayriladi $V_4 = V_3 - V_{Cs}$, natijada namuna spektridan ^{137}Cs ga tegishli barcha chiziqlardan tozalanadi;



3-rasm. Suv namunasi tarkibidagi uran ^{235}U ning γ -spektrini ajratish

- radiy (^{226}Ra) γ -chizig'i 186,2 keV va uran (^{235}U) 185,7 keV ni tashkil qiladi va fotocho'qqilar ustma-ust tushadi (3-rasmga qarang);
- namuna spektridan – V_4 uran (^{235}U) radionuklidi 185,7 keV li fotocho'qqi hosil qiladi;
- o'rganilayotgan suv namunasi tarkibidagi uran (^{235}U) miqdori (aktivligi) quyidagicha aniqlanadi:

$$A = \frac{S_{235\text{U}}}{k \cdot \varepsilon \cdot t} \quad (1)$$

(2) formuladagi ε – effektivlikning energetik qiymati jihatidan yaqin bo'lgan (^{226}Ra) ning 186,2 keV li fotocho'qqisi orqali hisoblab topishimiz mumkin:

$$\varepsilon = \frac{S_{226\text{Ra}(186,2\text{keV})} \cdot A_{226\text{Ra}}}{k \cdot t} \quad (2)$$

bu yerda $S_{226\text{Ra}(186,2\text{keV})}$ – OMACH etalon manbalaridagi ^{226}Ra ning 186,2 keV fotocho'qqining yuzasi, $A_{226\text{Ra}}$ – ^{226}Ra OMASN etalon manbaining aktivligi (pasportining qiymatiga qarang), k – ^{226}Ra ning 186,2 keV γ -chizig'i uchun kvant chiqishi ($k = 1$).

Radionuklidlarning minimal detektorlash aktivligi (MDA) 2 soatlik o'lchashlar natijasida ^{226}Ra , ^{232}Th va ^{137}Cs uchun $A = 10$ Bk/kg va ^{40}K uchun $A = 40$ Bk/kg ni tashkil qiladi. Shu qiymatdagi MDA uchun namunalardagi TRN ning o'lchashdagi nisbiy xatoligi $\delta A_n = 10 \div 20\%$ tashkil qiladi.

Olingan tajriba natijalari va ularning muhokamasi.

O'lchangan suv namunasi tarkibidagi TRN (^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K) va texnogen ^{137}Cs miqdori 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval.

	Aktivlik $A \pm \Delta A$ (Bk/l)				
	^{226}Ra	^{238}U	^{232}Th	^{40}K	^{137}Cs
Artesian suvi	<1,6	-	<1,2	0,67±0,20	<0,05
JSST (UNSCEAR)	4,9-60,0	3,0	11,0-64,0	140,0-1700,0	-

O'Ichangan artezian suvning asosiy xarakteristikasi 2-jadvalga keltirilgan

2-jadval.

	pH	EC, (mkCm/sm)	TDS, (mg/l)	T, °C
Artezian suvi	6,5	966	715	22,3

Olingan natijalar muhokamasi. 1-jadvalda keltirgan natijalardan quyidagicha xulosa chiqarish mumkin Yadro fizikasi laboratoriyasi hududiga joylashgan artesian quduq suvi takibida tabiiy radionuklidlar miqdori JSST (UNSCEAR) belgilab qo'yilgan miqdordan ancha past ekanligi aniqlandi. Tabiiy radionuklidlardan faqat ^{40}K miqdori aniqlash chegarasidan yuqori ekanligini ko'rish mumkin. Suv tarkibida ^{238}U miqdori aniqlanmadi.

Suv namunasi tarkibidagi ^{40}K miqdori suvning minerallanish darajasiga bog'liq bo'lib, artesian suvining minerallanish darajasi 715 mg/l teng, shu sababli bunday suvlarning tarkibida K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} kabi minerall elementlar mavjud, bu esa bunday suvlar tarkibida ^{40}K kabi tabiiy radionuklidlarning mavjudligidan darak beradi.

Tahlil natijalariga shuni ko'rsatdiki, radionuklidlar darajasi O'zbekiston Respublikasi Sanitariya-epidemiologik osoyishtalik va jamoat salomatligi xizmati (SanPiN) belgilab qo'yilgan chegaraviy qiymatdan past ekanligi ma'lum bo'ldi.

Xulosa o'rnida shuni aytishimiz mumkinki, Samarqand davlat universiteti, Yadro fizikasi laboratoriyasi hududidagi artesian quduq suvining radioaktivlik miqdori ancha past va xavfli darajada emas. Ushbu natijalar artesian suvini istemol qilishga yaroqli ekanligini tasdiqlaydi.

ADABIYOTLAR:

1. Bekjonov R.B. *Atom yadrosi va zarralar fizikasi*. – Toshkent: “O'qituvchi”, 1995 – 86-92-bet.
2. Перцов Л.А. *Ионизирующие излучения биосферы*. – Москва: Атомиздат”, 1973. – 34-40 стр.
3. Mo'minov A.T., Mo'minov T.M., Xolboev I., Axmedova G., Mamatqulov O.B. *Atrof-muhit obyektlarini gamma-spektrometriya usullari bilan tadqiq qilish. Monografiya*. – Toshkent: Vneshinvestprom, 2020. – 294 bet. ISBN 978-9943-6704-4-0.
4. Axmedova G. *Radioaktivlik va uning ahamiyati. Monografiya*. – Toshkent: Vneshinvestprom, 2020 – 186 bet.
5. Azimov A.N., Hushmuradov Sh.Kh., Muminov I.T., Muminov T.M., Osmanov B.S., Safarov A.N., Safarov A.A. *Gamma-spectrometric determination of natural radionuclides and ^{137}Cs concentrations in environmental samples. The improved scintillation technique // Radiation Measurements. V. 43, Issue 1, January 2008, P. 66-71.*

DATCHIKLARNING ASOSIY VA MAXSUS TAVSIFLARI

Axmedov Akbar Akramovich,

*Qarshi davlat texnika universiteti Shahrisabz
ozziq-ovqat muhandisligi fakulteti o‘qituvchisi
akbarakramovich1111@gmail.com*

Tursunov Alisher Ravshan o‘g‘li,

*Qarshi davlat texnika universiteti Shahrisabz
ozziq-ovqat muhandisligi fakulteti o‘qituvchisi
alishertursunov260@gmail.com*

Annotatsiya. *Datchiklarning ishlash samaradorligini belgilovchi asosiy va maxsus metrologik tavsiflar chuqur yoritiladi. Har bir datchikning aniqligi, barqarorligi va funksional imkoniyatlari uning sezgirlik, aniqlik, o‘lchash diapazoni, tezkorlik, uzatish funksiyasi, chiziqlilik darajasi, gisterezis, qayta yaratiluvchanlik, o‘lik zona va yechish qobiliyati kabi ko‘rsatkichlari orqali tavsiflanadi. Datchikning kirish va chiqish signallari o‘rtasidagi bog‘lanish uzatish funksiyasi chiziqli, logarifmik, eksponensial yoki darajali ko‘rinishlarda bo‘lishi, uning real va ideal xatti-harakatlarini solishtirish orqali baholanishi, kalibrlash sikllari, bo‘lakli-chiziqli approksimatsiya, eng kichik kvadratlar uslubi va “eng yaxshi to‘g‘ri chiziq” metodi kabi matematik yondashuvlar orqali datchikning real o‘lchash tavsiflarini aniqlash metodlari yoritilgan.*

Kalit so‘zlar: *gisterezis, nochiziqlilik, qayta yaratuvchanlik, o‘lik zona, qo‘zg‘atish signali, maxsus xarakteristikalar, chiqish impedansi, qo‘zg‘atish funksiyasi, statik baholash, statik xatolik.*

ОСНОВНЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

Аннотация. *В данной теме подробно раскрываются основные и специальные метрологические характеристики, определяющие эффективность работы датчиков. Точность, стабильность и функциональные возможности каждого датчика описываются через такие показатели, как чувствительность, погрешность, диапазон измерений, быстродействие, передаточная функция, степень линейности, гистерезис, воспроизводимость, мёртвая зона и разрешающая способность. Связь между входными и выходными сигналами датчика — передаточная функция — может иметь линейную, логарифмическую, экспоненциальную или степенную форму. Оценка характеристик датчика проводится путём сравнения его реального и идеального поведения. Также раскрыты методы определения реальных измерительных свойств датчика, такие как циклы калибровки, кусочно-линейная аппроксимация, метод наименьших квадратов и метод «наилучшей прямой».*

Ключевые слова: *гистерезис, нелинейность, воспроизводимость, мёртвая зона, возбуждающий сигнал, специальные характеристики, выходное сопротивление (импеданс), возбуждающая функция, статическая оценка, статическая погрешность.*

BASIC AND SPECIAL DESCRIPTIONS OF SENSORS

Abstract. *The topic provides an in-depth explanation of the primary and special metrological characteristics that determine the performance of sensors. The accuracy, stability, and functional capability of each sensor are described through parameters such as sensitivity, accuracy, measurement range, response speed, transfer function, linearity, hysteresis, repeatability, dead zone, and resolution. The relationship between the input and output signals of a sensor—its transfer function—may take linear, logarithmic, exponential, or power-law forms. The evaluation of real versus ideal sensor behavior, as well as methods for determining the actual measurement characteristics of sensors, are explained through mathematical approaches such as calibration cycles, piecewise-linear approximation, the least squares method, and the “best straight line” technique.*

Keywords: *hysteresis, nonlinearity, repeatability, dead zone, excitation signal, special characteristics, output impedance, excitation function, static evaluation, static error.*

Kirish. *Zamonaviy o‘lchash va boshqaruv tizimlarida datchiklar eng muhim bo‘g‘inlardan biri hisoblanadi. Har qanday avtomatlashtirilgan qurilma, nazorat-o‘lchash tizimi yoki intellektual texnologiya avvalo datchiklar orqali tashqi muhit haqidagi axborotni qabul qiladi. Datchikning qanchalik ishonchli, aniq va barqaror ishlashi butun tizimning samaradorligiga bevosita ta‘sir ko‘rsatadi. Shu bois datchiklarning asosiy va maxsus tavsiflarini chuqur o‘rganish zamonaviy metrologiya, avtomatika, elektronika va axborot*

texnologiyalari sohalari uchun dolzarb masalalardan biridir. Datchikning ishlash samaradorligi avvalo uning metrologik tavsiflari bilan belgilanadi. Ular ichida sezgirlik, aniqlik, o'lchash diapazoni, chiziqlilik (yoki nochiziqlilik), gisterezis, qayta yaratiluvchanlik, o'lik zona, yechish qobiliyati kabi ko'rsatkichlar alohida ahamiyatga ega. Shuningdek, datchikning kirish va chiqish signallari o'rtasidagi bog'lanishni ifodalovchi uzatish funksiyasi ham muhim nazariy tushuncha bo'lib, u datchikning ideal yoki real ishchi xatti-harakatini matematik va grafik shaklda tasvirlash imkonini beradi.

Uzatish funksiyasining chiziqli yoki nochiziqli bo'lishi, bo'lakli-chiziqli yoki yuqori tartibli polinomlar bilan approksimatsiyalanishi datchikdan olinadigan ma'lumotlarning qay darajada aniq va qayta ishlashga qulayligini ko'rsatadi. Amaliyotda datchiklar faqat bitta tashqi ta'sirga emas, balki bir vaqtning o'zida bir nechta omillarga bog'liq bo'lishi mumkin. Masalan, infraqizil harorat datchiklarida chiqish signali nafaqat obyekt haroratiga, balki sezgir element yuzasining haroratiga ham bog'liq bo'ladi. Bunday hollarda uzatish funksiyasi ko'p o'lchamli ko'rinishga ega bo'lib, datchikni loyihalash va kalibrlash jarayonini yanada murakkablashtiradi. Shuningdek, datchikning to'yinish zonasi, nochiziqlilik darajasi, kalibrlash egri chizig'ini tanlash usullari (eng kichik kvadratlar, eng yaxshi to'g'ri chiziq va hokazo) ham o'lchash natijalarining ishonchliligini belgilovchi omillardan hisoblanadi. Datchiklarning maxsus tavsiflari qatoriga esa chiqish impedansi, qo'zg'atish signali talablari, spektral sezgirlik, konstruktiv o'lchamlari, og'irligi, energiya sarfi va ekspluatatsion ishonchliligi kiradi. Bu ko'rsatkichlar datchikning elektron sxemalar bilan mosligi, turli muhitlarda (havo, suv, agressiv muhit) ishlash imkoniyati hamda ma'lum sohada (tibbiyot, mudofaa sanoati, maishiy texnika va boshqalar) qo'llash maqsadga muvofiqligini belgilaydi. Shunday qilib, "Datchiklarning asosiy va maxsus tavsiflari" mavzusi datchiklarning nazariy va amaliy jihatlarini kompleks o'rganishga xizmat qilib, o'lchash tizimlarining sifatini oshirish va ularni takomillashtirishda muhim metodik asos bo'lib xizmat qiladi.

Qo'llanilgan metodlar. Har qanday datchikning ishlash samaradorligi uning asosiy metrologik tavsiflari bilan aniqlanadi. Quyida datchiklarning eng muhim to'rt ko'rsatkichi — sezgirlik, aniqlik, o'lchash diapazoni va tezkorlik haqida batafsil ma'lumot beriladi. Sezgirlik (S) Datchik sezgirligi chiqish signalining kirish kattaligidagi o'zgarishga nisbati. Ya'ni, tashqi ta'sir (masalan, harorat, bosim, kuch) o'zgarganda chiqish elektr signali qanday tez o'zgarishini ko'rsatadi. Datchikka kirib kelgan kirish signali chiquvchi elektr signaliga aylanishidan oldin o'zgartirishlarning bir necha bosqichlari talab qilinishi mumkin. Misol tariqasida optik tolali bosim datchigini ko'rib chiqamiz. Datchikka ta'sir ko'rsatayotgan tashqi bosim tolali svetovodning (yorug'lik o'tkazgichining) deformatsiyasini chaqiradi. Bu o'z navbatida uning sindirish ko'rsatkichining o'zgarishiga olib keladi, buning oqibatida optik uzatish liniyasining tavsiflari o'zgaradi va fotonlar zichligining modulyatsiyalanishi sodir bo'ladi. Fotonlarning natijalovchi oqimi detektorlanadi va elektr tokiga aylanadi. Bunda datchiklar "Qora qutilar" ko'rinishida taqdim qilinadi, bu yerda faqatgina ularning kirishlari va chiqishlaridagi signallar o'rtasidagi o'zaro nisbatlar muhim bo'ladi. Datchikning metrologik xususiyatlarini baholashda gisterezisni aniqlash metodi (kirish signali ortishi va kamayishi uchun chiqish signallari farqini solishtirish), qayta yaraluvchanlikni baholash metodi (takroriy kalibrlash sikllarida olingan chiqish qiymatlarining maksimal farqini topish), o'lik zona va yechish qobiliyatini aniqlash metodi (kirish signali o'zgarganda chiqish signalida minimal sezilarli o'zgarish paydo bo'ladigan chegarani aniqlash) keltirilgan. Bundan tashqari, infraqizil harorat datchigi misolida ko'p omilli uzatish funksiyasi $V = G(T(b)^4 + T(s)^4)$ orqali ko'p o'lchamli funksional model tuzish metodi qo'llanadi. Datchikning chiqish va kirish impedanslarini moslashtirish, tokli va kuchlanishli ulanish sxemalarini tahlil qilish orqali elektrik moslashtirish va interfeys sxemasini hisoblash metodi qo'llanib, qo'zg'atish signali parametrlarining (tok, kuchlanish, chastota) uzatish funksiyasiga ta'siri nazariy tahlil qilinadi. Shu tariqa matnda datchiklarning sezgirlik, aniqlik, nochiziqlilik, gisterezis, qayta yaraluvchanlik, o'lik zona, yechish qobiliyati va elektr moslashuvini ilmiy asosda tavsiflash uchun nazariy model tuzish, kalibrlash, regressiya, approksimatsiya va chiziqdashirish metodlari kompleks qo'llanilgan.

Olingan natijalar va ularning tahlili. Uzatish funksiyasi. Har bir datchik uchun uning kirishidagi va chiqishidagi signallarni bog'laydigan *ideal* yoki *nazariy* o'zaro nisbatni chiqarish mumkin. Agar datchikni ideal tarzda loyihalash, uni ideal materiallardan ideal uskunalar bilan tayyorlash mumkin bo'lganda edi, bunda barcha ishlar ideal xodimlar tomonidan bajarilsa, u holda bunday datchikning chiqishidagi signal har doim tashqi ta'sirning real qiymatiga mos kelgan bo'lar edi. Kiruvchi va chiquvchi signallar o'rtasidagi chiqarilgan ideal o'zaro nisbatni yoki jadval, yoki grafik, yoki matematik ifoda ko'rinishida ifodalash mumkin. Bu ideal (nazariy) ifoda ko'pincha uzatish funksiyasi deb ataladi. Uzatish funksiyasi datchikning S chiqish elektr signali bilan x tashqi ta'sir o'rtasidagi o'zaro bog'lanishni o'rnatadi.

$$S=f(x)$$

Bu funksiya chiziqli bodishi ham, nochiziqli bodishi ham (masalan logarifmik, eksponensial yoki darajali) mumkin. Ko'pgina hollarda uzatish funksiyasi bir odchamli bodadi (ya'ni chiquvchi signalni

faqatgina bitta tashqi ta'sir bilan bogdaydi). Bir odchamli chiziqli funksiyani quyidagi ko'rinishda taqdim qilish mumkin: $S = a + bs$. Bunda a - doimiy tarkib toptiruvchi (ya'ni chiquvchi signalning tashqi ta'sir nolga teng bodgandagi qiymati); b - to'g'ri chiziqning egilishi, u ko'pincha datchikning *sezgirligi* deb ataladi; S parametr - bu elektr signalining ma'lumotlar to'plash tizimi datchikning chiqish signali sifatida qabul qiladigan tavsifidir. Datchikning hususiyatlariga bogdiq ravishda bu amplituda, chastota yoki faza bodishi mumkin.

Logarifmik uzatish funksiyasi quyidagi ko'rinishga ega boladi: $S = a + bl_{ns}$ Eksponensial uzatish funksiyasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi: $S = ae^{ks}$

Darajali uzatish funksiyasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi: $S = a_0 + a_1 s^k$

Bu yerda k – doimiy son.

Agar datchik yuqorida keltirilgan approksimatsion ifodalar bilan tavsiflanishning iloji bo'lmagan uzatish funksiyasiga ega bo'lsa, bunda yuqoriroq tartibli polinomial approksimatsiyalar qo'llaniladi.

Nochiziqli uzatish funksiyalari uchun b sezgirlik chiziqli bog'lanishlar holatidan farqli o'laroq, konstanta bo'lib hisoblanmaydi. Shu sababli kirish signalining har bir konkret qiymati uchun uni quyidagicha aniqlash mumkin:

Ko'pgina hollarda nochiziqli datchiklar chegaralangan qiymatlar diapazonining ichida chiziqli deb

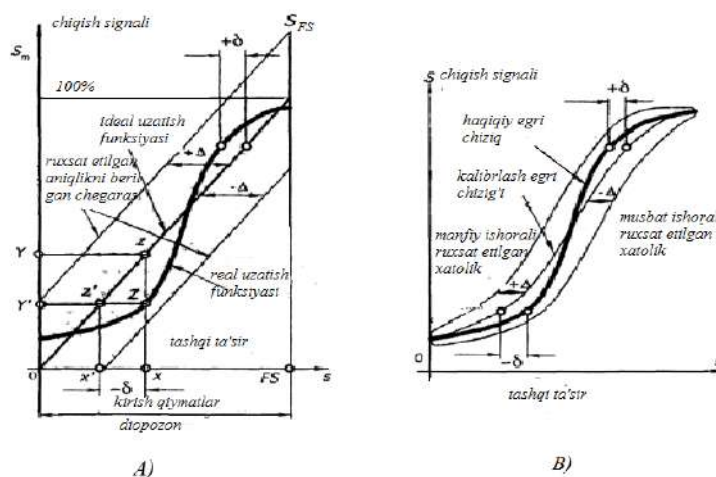
$$b = \frac{dS(s_0)}{ds}$$

hisoblanishi mumkin. Kengroq qiymatlar diapazoni uchun uzatish funksiyasi bir nechta to'g'ri chiziqlarning kesmalari ko'rinishida taqdim qilinadi. Bu bo'lakli-chiziqli approksimatsiya deb ataladi. Berilgan uzatish funksiyasini chiziqli bog'lanish ko'rinishida taqdim qilish mumkin bo'lishi yoki bo'lmasligini aniqlash uchun kirish signalini asta-sekin oshirib borish bilan chiziqli va real modellarda chiqish signalining farqlanishi kuzatiladi. Agar signallar farqi yo'l qo'yiladigan chegaralardan tashqariga chiqmasa, berilgan datchikning uzatish funksiyasini chiziqli deb hisoblash mumkin bo'ladi.

Datchikning kirish signaliga bir nechta tashqi ta'sirlar ta'sir ko'rsatadigan hollarda uning uzatish funksiyasi ko'p o'lchamli bo'lib qoladi. Ikki o'lchamli uzatish funksiyasiga ega bo'lgan datchikka infraqizil harorat datchigi misol bo'la oladi. Uning uzatish funksiyasi ikkita haroratni (T/b) – o'lchanadigan obyektning absolyut harorati va T_s – sensor elementi yuzasining absolyut harorati) V kuchlanish bilan bog'laydi.

$$V = G(T_b^4 + T_s^4)$$

Bunda G – konstanta. Ifodadan ko'rinib turibdiki, obyektning harorati bilan chiqish kuchlanishi o'rtasidagi bog'lanish (uzatish funksiyasi) faqatgina nochiziqli (to'rtinchi tartibli parabola) bo'lib qolmasdan, u shuningdek sezgir elementning yuzasidagi haroratga ham bog'liq bo'ladi.

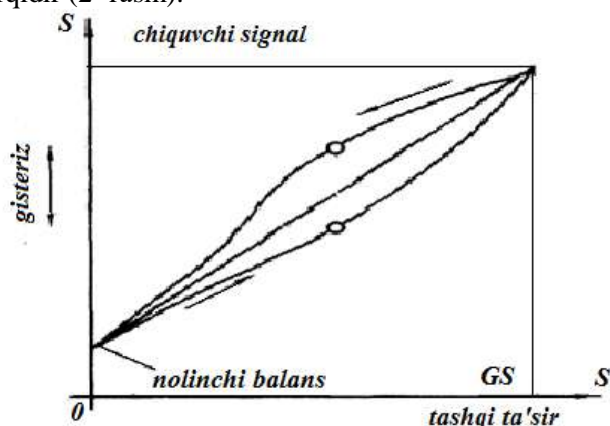


1-rasm. Uzatish funksiyasi (A) va yo'l qo'yiladigan xatoliklar chegaralari (B). Xatoliklar kirish qiymatlariga nisbatan aniqlangan

Datchiklarning aniqligiga gisterezis, o'lik zona, kalibrlash parametrlari, datchiklarning partiyadan partiyaga takrorlanuvchanligi, xatoliklarning qayta yaralishi kabi xarakteristikalar ta'sir ko'rsatadi, ular keyingi bo'limlarda ko'rib chiqiladi. Eng chekka yo'l qo'yiladigan xatoliklar odatda datchiklarning eng yomon ishchi xarakteristikalariga to'g'ri keladi. 1 B-rasmdan ko'rinib turibdiki, kalibrlash aniqroq bajarilganda (masalan, kalibrlash ko'p sonli nuqtalarda o'tkazilganda) kalibrlash egri chizig'i real uzatish funksiyalariga yaqinroqdan o'tadi, bu o'lchaslar aniqligining oshganligini bildiradi. Amaliyotda yo'l

qo'yiladigan xatoliklarning chegaralari ideal uzatish funksiyalarning atrofida emas, balki kalibr lash egri chiziqlariga nisbatan o'rnatiladi.

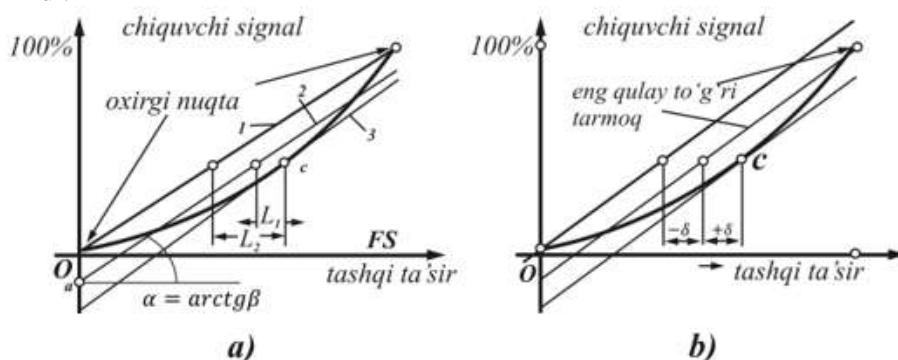
Gisterezis – bu xuddi o'sha bitta kirish signali uchun uning ortishida va kamayishida olingan chiqish signallari qiymatlarining farqidir (2- rasm).



2-rasm. Gisterezisga ega bo'lgan uzatish funksiyasi

Nochiziqlik deganda – real uzatish funksiyasining approksimatsiyalaydigan to'g'ri chiziqdan L maksimal chetlashishi tushuniladi. “Chiziqlik” deganda aslida “nochiziqlik” tushuniladi. Kalibr lashning bir nechta sikllarini o'tkazishda nochiziqlikning olingan qiymatlaridan eng yomon tanlanadi. Nochiziqlik odatda yoki maksimal kirish signalidan foizlarda yoki o'lchanadigan kattalikning birliklarida (masalan, kPa yoki °C) ifodalanadi. Approksimatsiya chizig'ini o'tkazish usuliga bog'liq ravishda chiziq lashtirishning bir nechta tipi farqlanadi. Bu usullardan biri – to'g'ri chiziqni uzatish funksiyasining oxirgi nuqtalari orqali o'tkazishdir. Buning uchun avval eng katta va eng kichik tashqi ta'sirlarga mos keladigan chiqish qiymatlari aniqlanadi, shundan keyin bu nuqtalar orqali to'g'ri chiziq o'tkaziladi (1 chiziq).

Bunday chiziq lashtirishda nochiziqlik xatosi oxirgi nuqtalarda minimal va ularning oralig'ida qayerdadir maksimal bo'ladi. Boshqa bir chiziq lashtirish usuli eng kichik kvadratlar uslubini qo'llashga asoslanadi (3A rasmda 2 chiziq). Buning uchun o'lchanadigan kattaliklarning keng diapazonida (eng yaxshisi to'liq diapazonida) S tashqi ta'sirlarning bir qator qiymatlari (n) uchun S chiqish signallari o'lchanadi. Shundan keyin chiziqli repressiya formulasini qo'llash bilan a va b koeffitsiyentlarning qiymatlari aniqlanadi:



3-rasm. Nochiziqli uzatish funksiyasini a) chiziqli approksimatsiyalash va b) mustaqil chiziq lashtirish

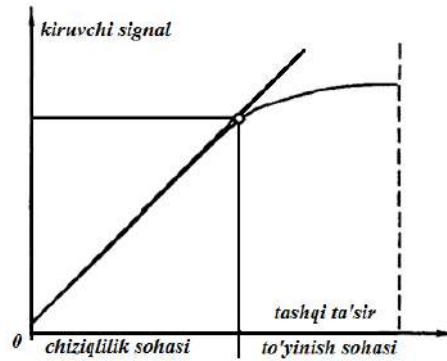
Amaliyotda, ba'zi bir hollarda kirish signallarining tor diapazonida chiziq lashtirishning katta aniqligi talab qilinishi mumkin. Masalan tibbiyot termometrlari 37°C ... 38°C diapazonda oshirilgan aniqlikka ega bo'lishi lozim. Bu zonadan tashqarida aniqlik biroz pastroq bo'lishi mumkin. Bunday holda kalibr lash aniqlik talab qilinadigan tor sohada o'tkaziladi, shundan keyin S kalibr lash nuqtasi orqali approksimatsiyalash chizig'i o'tkaziladi (3A rasmda 3 chiziq). Bunday protsedura natijasida eng kichik nochiziqlik qiymatiga kalibr lash nuqtasi zonasida erishiladi, o'lchashlar diapazonining oxirlariga yaqin joylarda esa chiziqlik sezilarli darajada yomonlashadi.

$$\delta_a = a_1 - a = \frac{\Delta}{s_2 - s_1}$$

Rasmdan ko'rinib turibdiki, mazkur uslubda approksimatsiya chizig'i ko'pincha uzatish funksiyasiga s kalibr lash nuqtasida tegib o'tadigan urinma bo'lib hisoblanadi. Agar real uzatish funksiyasi uchun ifoda ma'lum bo'lsa, bu chiziqning egilishini tenglama bo'yicha topish mumkin.

Mustaqil chiziqlashtirish uslubi ko‘pincha “eng yaxshi to‘g‘ri chiziq uslubi” deb ataladi (4B-rasm). U bir-biriga mumkin qadar yaqin joylashgan va real uzatish funksiyasining barcha chiqish qiymatlarini qamrab oladigan ikkita parallel to‘g‘ri chiziqning o‘rtasidan o‘tadigan to‘g‘ri chiziqni topishdan iborat bo‘ladi. Chiziqlashtirish uslubiga bog‘liq ravishda approksimatsiyalaydigan chiziq turlicha a va b koeffitsiyentlarga ega bo‘ladi. Shundan kelib chiqqan holda, turlicha usullar bilan olingan nochiziqlik qiymatlari bir-biridan jiddiy farq qilishi mumkin.

Har bir datchik o‘zining ishchi xarakteristikalarining chegaralariga ega bo‘ladi. U hatto chiziq bo‘lib hisoblangan taqdirda ham, tashqi ta‘sirning ma‘lum bir darajasida uning tashqi signali keltirilgan chiziqli bog‘lanishga javob bera olmay qoladi. Bunday holda datchik nochiziqlik zonasiga yoki to‘yinish zonasiga kirdi deyiladi (4- rasm).

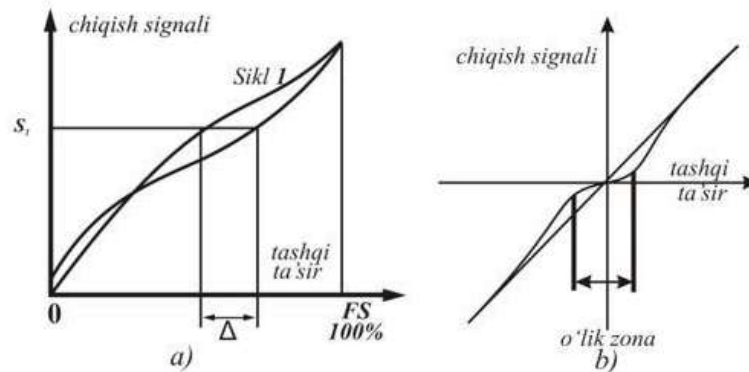


4- rasm. To‘yinishga ega bo‘lgan uzatish funksiyasi

Qayta yaratuvchanlik datchikning bir xil shart-sharoitlarga amal qilinganda bir xil natijalarni bera olish qobiliyatidir. Natijalarning qayta yaraluvchanligi datchikning kalibrlashning ikkita siklida olingan chiqish qiymatlarining maksimal farqi bo‘yicha aniqlanadi (5-A rasm). U, odatda, kirish signalining maksimal qiymatidan foizlarda ifodalanadi:

$$\delta_r = \frac{\Delta}{FS} \times 100\%$$

Natijalarning yomon qayta yaralishining sabablari ko‘pincha quyidagilar bo‘lib hisoblanadi: issiqlikli shovqini, yuzadagi zaryadlar, materiallarning plastikliги va hokazolar.

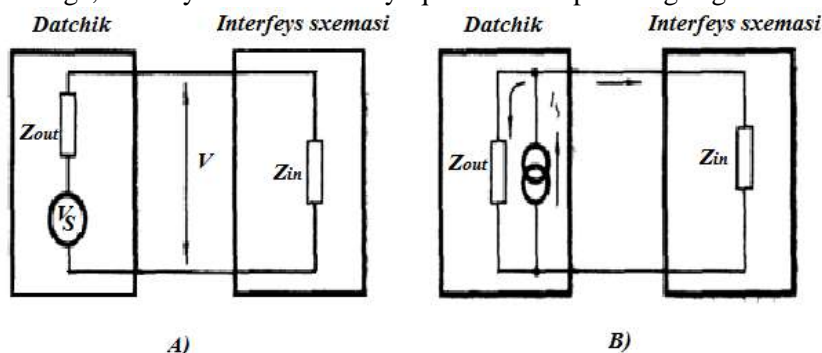


5-rasm. a – qayta yaratuvchanlik xatoligi: xuddi o‘sha bitta chiqish signaliga turli tashqi ta‘sirilar mos keladi. b – uzatish funksiyasidagi o‘lik zona

O‘lik zona kirish signallarining ma‘lum bir diapazonida datchikning sezmasligidir (5B-rasm). Bu zona oralig‘ida chiqish signali deyarli o‘zgarmas bo‘lib qolaveradi (ko‘pincha nolga teng bo‘ladi). Bunga qo‘shimcha ravishda har qanday signalni raqamli kodga aylantirishda uning mayda zinalarga bo‘linishi sodir bo‘ladi, bu zinalarning har biriga konkret qiymat to‘g‘ri keladi. Kirish signalining ma‘lum bir sharoitlarda datchikning chiqish signalida minimal zina paydo bo‘lishiga olib keladigan o‘zgarish kattaligi *datchikning yechish qobiliyati* deb ataladi.

Ba‘zi bir datchiklar uchun kirish signallarining maxsus xarakteristikalarini ko‘rsatish zarur bo‘ladi. Masalan yoritilganlik detektorlari uchun uning chegaralangan optik polosa oralig‘ida sezuvchanligi shunday xarakteristika bo‘lib hisoblanadi. Shundan kelib chiqqan holda, bunday datchiklar uchun spektral xarakteristikalarini aniqlash zarur bo‘ladi.

Zout chiqish impedansi datchik elektron sxema bilan qanchalik oson muvofiqlasha olishini ko'rsatuvchi xarakteristika bo'lib hisoblanadi. Datchikning chiqish impedansiga mos keladigan qarshilik elektron sxemaning *Zin* kirish impedansini xarakterlaydigan qarshilikka parallel qilib (potensial ulanish) yoki u bilan ketma-ket (tokli ulanish) ulanadi. Har ikkala ulash varianti 6-rasmda ko'rsatilgan. Odatda kirish va chiqish impedanslari majmuaviy ko'rinishda taqdim qilinadi, chunki ular, qoidaga ko'ra, aktiv va reaktiv tarkibiy qismlarni o'z ichiga oladi. Datchikning chiqish signalining og'ishini minimallashtirish uchun tokli chiqishga ega bo'lgan datchik (6B-rasm) maksimal mumkin bo'lgan chiqish impedansiga, uning interfeys sxemasi esa – minimal kirish impedansiga ega bo'lishi lozim. Potensial ulash holatida (6A-rasm) datchik past chiqish impedansiga, interfeys sxemasi esa – yuqori kirish impedansiga ega bo'lishi lozim.



6-rasm. Datchikning interfeys sxemasi bilan ulanishi. A) – kuchlanish ko'rinishidagi chiqish signaliga ega bo'lgan datchik, B) – tokli chiqish signaliga ega bo'lgan datchik

Qo'zg'atish signali – bu aktiv datchikka ishlash uchun zarur bo'ladigan elektr signaldir. Qo'zg'atish signali kuchlanish yoki tok intervali bilan tasvirlanadi. Datchiklarning ba'zi bir tiplari uchun qo'zg'atish signalining chastotasi va uning turg'unligini ko'rsatish zarur bo'ladi. Qo'zg'atish signalining ko'rsatilgan chegaralardan tashqariga chiqishi datchikning uzatish funksiyasining o'zgarishiga va shundan kelib chiqqan holda chiqish signalining og'ishiga olib kelishi mumkin. Qo'zg'atish signalini tasvirlashga misol keltiramiz:

Termistor orqali oqib o'tadigan maksimal tok:

Qarshiliksiz havoda.....– 50 mA;

Suvda– 200 mA.

Xulosa. Turli sohalarida qo'llash mumkin bo'lishi uchun datchiklarning quyidagi xarakteristikalari muhim bo'ladi: ularning *konstruksiya, og'irligi va gabaritlari*. Agar datchiklar uchun aniqlik va ishonchlilik bosh parametrlar bo'lib hisoblansa, uning narxi kabi xarakteristikasi ikkinchi planga chekinadi. Agar qurilma, yashashni ta'minlash tizimlari, mudofaa sanoati yoki fazoviy kemalar uchun mo'ljallangan bo'lsa, ularning narxining qimmatligi har doim aniqlik va ishonchlilik bo'yicha qo'yiladigan talablar bilan oqlanadi. Biroq datchiklar qo'llaniladigan bir qator sohalar borki – bunda ularning narxi asosiy xarakteristika bo'lib hisoblanadi.

ADABIYOTLAR:

1. Toirov A., Qodirov Sh., "Metrologiya, standartlashtirish va sertifikatlash" Darslik.- Toshkent. "Fan va texnologiya", 2019.
2. Karimov A., Ismailov O. "Elektr o'lchash asboblari va o'zgartkichlari", Toshkent. - 2016.
3. Qurbonov H. "O'lchash texnikasi asoslari" Toshkent. "Navoiy nomidagi universitet nashriyoti", 2020.
4. Raxmatov H.R. "Metrologiya va o'lchash qurilmalari". Toshkent. "Talqin", 2018.
5. Yusupov A., Maxmudov E. "O'lchash vositalarining tuzilishi va ishlash prinsiplari" Toshkent. "Iqtisodiyot va fan", 2021.
6. Ernest O. Doebelin, "Measurement Systems: Application and Design" McGraw-Hill, 2017 (6th Edition).
7. Vijayaraghavan G.K., Rajappan R., Engineering Metrology and Measurements, For 5th Semester Mechanical and Automobile Engineering (As per the Latest Anna University Syllabus - Reg., 2008).
8. Dj. Frayden. Handbook of modern sensors. / Springer-Verlag New York, Inc., 2015.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ ЗА ОБРАТНОЙ
СТУПЕНЬКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ LES-МОДЕЛИ**

Мадалиев Муродил Эркинжон угли,
Ферганский государственный технический
университет, Фергана, Узбекистан
Madaliev.me2019@mail.ru,

Носирова Намунабону Азамат кизи,
Институт механики и сейсмостойкости сооружений
им. М.Т. Уразбаева Академии наук
Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан
nosirova.namunabonu@mail.ru,

Мухаммадқубов Хусанбой Элмурод угли,
Ферганский государственный технический
университет, Фергана, Узбекистан
xusanboy.muhammadyoqubov@mail.ru

Аннотация. В работе выполнено трёхмерное численное моделирование турбулентного течения за обратной ступенькой при числе Рейнольдса $Re_H=36,000$ с использованием модели крупных вихрей (LES). Расчёты проводились в программном комплексе ANSYS Fluent с применением подрешёточной модели WALE, обеспечивающей корректное воспроизведение нестационарных вихревых структур и зон рециркуляции. Построена трёхмерная гексагональная сетка с локальным сгущением вблизи стенок ($y^+ \approx 1$) и в области отрыва потока. На основе полученных численных данных выполнен анализ полей скорости, изолиний и векторов течения, распределений коэффициентов давления C_p и трения C_f , а также профилей средней скорости и компонентов Рейнольдсовых напряжений в различных продольных сечениях ($x/H=1,4,6$). Результаты LES-моделирования демонстрируют характерные особенности отрывного течения за ступенькой: наличие зоны обратных скоростей, развитие крупномасштабных вихрей и область повторного присоединения потока на расстоянии около $x/H \approx 6.2$. Полученные поля и распределения подтверждают высокую точность и эффективность LES-подхода для исследования трёхмерных турбулентных течений.

Ключевые слова: уравнения Навье–Стокса, отрывное течение, модель LES, Ansys Fluent.

**LES MODELIDAN FOYDALANGAN HOLDA TESKARI BOSQICH ORTIDAGI UCH
O'LCHOVLI OQIMNING RAQAMLI SIMULYATSIYASI**

Annotatsiya. Ishda katta vorteks (LES) modelidan foydalangan holda Reynolds $Re_H=36,000$ raqami bilan teskari pog'onaning orqasida turbulent oqimning uch o'lchovli raqamli simulyatsiyasi amalga oshirildi. Hisob-kitoblar ANSYS Fluent dasturiy majmuasida wale pastki panjara modelidan foydalangan holda amalga oshirildi, bu esa statsionar bo'lmagan vorteks tuzilmalari va qayta ishlash zonalarining to'g'ri takrorlanishini ta'minlaydi. ulosa. Ishda katta vorteks (LES) modelidan foydalangan holda Reynolds $Re_H=36,000$ raqami bilan teskari pog'onaning orqasida turbulent oqimning uch o'lchovli raqamli simulyatsiyasi amalga oshirildi. Hisob-kitoblar ANSYS Fluent dasturiy majmuasida wale pastki panjara modelidan foydalangan holda amalga oshirildi, bu esa statsionar bo'lmagan vorteks tuzilmalari va qayta ishlash zonalarining to'g'ri takrorlanishini ta'minlaydi. Devorlar yaqinida ($y^+ \approx 1$) va oqim uzilishi sohasida lokal qalinlashgan uch o'lchamli olti burchakli to'r qurilgan. Olingan raqamli ma'lumotlar asosida tezlik maydonlari, oqim izolinlari va vektorlari, bosim va ishqalanish koeffitsientlarining taqsimotlari, shuningdek, turli uzunlamasina bo'limlarda ($x/H=1,4,6$) Reynolds kuchlanishining o'rtacha tezlik profillari va tarkibiy qismlari tahlil qilindi. lingan raqamli ma'lumotlar asosida tezlik maydonlari, oqim izolinlari va vektorlari, bosim va ishqalanish koeffitsientlarining taqsimotlari, shuningdek, turli uzunlamasina bo'limlarda ($x/H=1,4,6$) Reynolds kuchlanishining o'rtacha tezlik profillari va tarkibiy qismlari tahlil qilindi. LES simulyatsiyasi natijalari pog'onadan tashqarida uzilish oqimining o'ziga xos xususiyatlarini namoyish etadi: teskari tezlik zonasining mavjudligi, keng ko'lamli girdoblarning rivojlanishi va oqimning qayta ulanish maydoni $x/H \approx 6.2$ atrofida. Olingan maydonlar va taqsimotlar uch o'lchovli turbulent oqimlarni o'rganish uchun LES yondashuvining yuqori aniqligi va samaradorligini tasdiqlaydi.

NUMERICAL SIMULATION OF THE THREE-DIMENSIONAL FLOW BEHIND THE REVERSE STEP USING THE LES MODEL

Abstract. *The paper presents a three-dimensional numerical simulation of the turbulent flow beyond the reverse step at the Reynolds number $ReH=36,000$ using the large vortex model (LES). The calculations were performed in the ANSYS Fluent software package using the WALE subgrid model, which ensures the correct reproduction of unsteady vortex structures and recirculation zones. A three-dimensional hexagonal grid with local condensation near the walls ($y^+\approx 1$) and in the area of flow separation is constructed. Based on the numerical data obtained, the analysis of velocity fields, isolines and flow vectors, distributions of pressure and friction coefficients, as well as profiles of average velocity and components of Reynolds stresses in various longitudinal sections ($x/H=1,4,6$) is performed. The results of the LES simulation demonstrate the characteristic features of the separation flow beyond the step: the presence of a zone of reverse velocities, the development of large-scale vortices, and the area of flow reconnection at a distance of about $xr/H\approx 6.2$. The obtained fields and distributions confirm the high accuracy and efficiency of the LES approach for studying three-dimensional turbulent flows.*

Keywords: *Navier–Stokes equations, separation flow, LES model, Ansys Fluent.*

Введение. Течение за обратной ступенькой (backward-facing step, BFS) является одним из наиболее изученных и в то же время сложных примеров отрывного турбулентного потока. Данная задача служит эталонной для проверки и валидации численных методов вычислительной гидродинамики (CFD) и моделей турбулентности, так как включает основные элементы реальных течений – отделение, рециркуляцию и повторное присоединение потока [1–2].

Впервые экспериментальные исследования течения за обратной ступенькой были подробно проведены Driver и Seegmiller (NASA, 1985) [3], где были получены данные по структуре скорости, давлению и турбулентным напряжениям при числе Рейнольдса $Re_H=36,000$. Эти результаты впоследствии стали классическим эталоном для численных исследований, включая RANS, LES и DNS моделирование. Традиционные модели осреднённых уравнений Навье–Стокса (RANS), такие как $k-\varepsilon$, $k-\omega$ и модели Рейнольдсовых напряжений (RSM), не всегда способны адекватно воспроизводить нестационарную структуру вихрей и взаимодействие сдвигового слоя с зоной рециркуляции. В отличие от них, модель крупных вихрей (LES) позволяет явно разрешать крупномасштабные нестационарные вихревые образования и лишь приближённо моделирует мелкомасштабные флуктуации. Это обеспечивает более точное описание динамики турбулентного течения, особенно в областях с сильной нестационарностью и отрывом потока [4–5].

В настоящей работе выполнено трёхмерное численное моделирование течения воздуха за обратной ступенькой при $Re_H=36,000$ с использованием подрешёточной модели WALE (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity), реализованной в программном комплексе ANSYS Fluent. Исследование направлено на получение детальной картины течения, включая поля средней скорости, изолинии и векторы скорости, распределения коэффициентов давления и трения, а также изменение компонент Рейнольдсовых напряжений в различных продольных сечениях [8–12].

Полученные результаты предназначены для анализа характеристик отрывного турбулентного течения и оценки возможностей LES-моделирования при решении трёхмерных задач гидродинамики без привлечения экспериментальных данных. Работа является частью комплексных исследований по верификации численных методов моделирования турбулентных течений и может быть использована для дальнейшего сравнения с RANS и DNS подходами.

Физическая постановка задачи. Представленные данные взяты из работы Driver, D. M. and Seegmiller [3]. Этот случай также служит тестовым примером, включённым в базу данных ERCOFTAC, и широко применяется в рамках семинаров по моделированию турбулентных потоков. В данной задаче турбулентный пограничный слой взаимодействует с резким отклонением, что приводит к отрыву потока. После этого поток вновь прикрепляется и восстанавливается за ступенью. Число Рейнольдса, рассчитанное на основе толщины импульсного слоя перед ступенькой, равно 5000, что соответствует числу Рейнольдса порядка 36 000 при расчёте с учётом высоты ступени H . Перед ступенью толщина пограничного слоя составляет приблизительно 1,5 H (смотрите рисунок 1). Граничные условия, используемые для моделирования методом CFD, представлены на следующем рисунке 1.

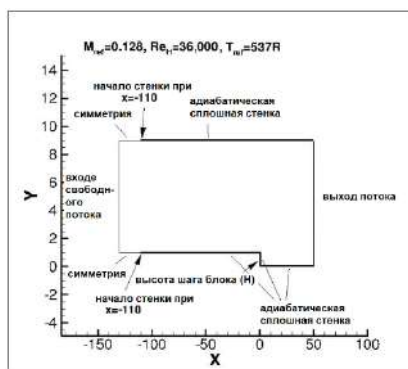


Рисунок 1. Граничные условия 2D-шаг с обратным направлением

Математическая постановка задачи. Для численного моделирования турбулентных течений в рамках подхода LES (Large Eddy Simulation) в настоящей работе использована модель подрешёточного масштаба WALE (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity). Данная модель обеспечивает высокую точность при разрешении крупных вихрей и адекватно адаптируется к прибрежным областям, что делает её особенно эффективной для задач с наличием стенок и резких градиентов скорости. В модели WALE турбулентная вязкость подрешёточного масштаба рассчитывается на основе локальных градиентов скорости, с учётом как вращательных, так и деформационных характеристик потока. Это позволяет модели точно воспроизводить поведение вихревых структур как в объёме, так и вблизи твёрдых границ, в отличие от классической модели Смогоринского. В настройках расчёта активирована опция Optimized LES Numerics, обеспечивающая использование численно устойчивых схем, оптимизированных для LES, что способствует повышению точности и стабильности решения. Опция Near Wall RANS Layer (WMLES) в данной работе отключена, поскольку моделирование осуществляется с достаточным пространственным разрешением вблизи стенок, без необходимости использования гибридного подхода.

LES основывается на фильтрованных уравнениях Навье–Стокса для несжимаемой жидкости. Основная идея – разделить поток на разрешённые (крупномасштабные) и нерешённые (мелкомасштабные) компоненты путём пространственной фильтрации.

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}^{SGS}}{\partial x_j}. \end{cases} \quad (1)$$

где \bar{u}_i – фильтрованные компоненты скорости, \bar{p} – фильтрованное давление, F_i – внешняя сила, τ_{ij}^{SGS} – тензор подрешёточных напряжений (Subgrid Scale Stresses), моделирующий влияние мелкомасштабных вихрей.

Моделирование подрешёточного тензора напряжений (SGS):

$$\tau_{ij}^{SGS} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j. \quad (2)$$

Так как τ_{ij}^{SGS} неизвестен, он моделируется через турбулентную подрешёточную вязкость:

$$\tau_{ij}^{SGS} - \frac{1}{3} \tau_{kk}^{SGS} \delta_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij}. \quad (3)$$

где: ν_t – подрешёточная (турбулентная) вязкость; \bar{S}_{ij} – тензор скоростей деформации:

Основные формулы модели WALE турбулентная вязкость подрешёточного масштаба:

$$\nu_t = (C_w \Delta)^2 \cdot \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}}. \quad (4)$$

Эта вязкость моделируется, как правило, с использованием моделей типа Смогоринского [8]:

Расчётная сетка. На рисунке 2 представлена трёхмерная гексагональная расчётная сетка, построенная для моделирования течения за обратной ступенькой с применением модели крупномасштабных вихрей (LES).

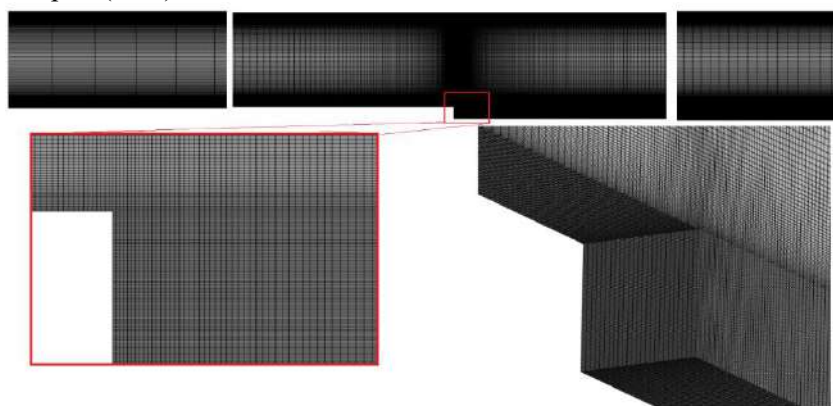


Рисунок 2. Трёхмерная гексагональная расчётная сетка

Геометрия расчётной области включает участок до ступеньки, саму ступеньку и проточную часть за ней. Общее количество ячеек составило 1 856 250, при этом все элементы – гексагональные (hexahedral cells). Такая структура сетки обеспечивает высокую точность аппроксимации и устойчивость решения при моделировании турбулентных структур в зоне отрыва и повторного присоединения потока. Сетка включает следующие граничные зоны: Зоны 1 и 8 – стенки (wall faces), всего 76 750 + 20 000 граней; Зона 6 – входное сечение (velocity-inlet), 3 875 граней; Зона 7 – выходное сечение (pressure-outlet), 3 875 граней; Зона 9 – плоскости симметрии (symmetry faces), 74 250 граней; Зона 2 – внутренние грани (interior faces), 5 479 375. Общее количество узлов – 1 946 256. Как видно на увеличенном фрагменте, в области ступеньки и вдоль прилегающих стенок шаг сетки локально сгущён для точного разрешения пограничного слоя и вихревых структур. Минимальный размер ячейки выбран таким образом, чтобы безразмерная координата $y^+ \approx 1$, что соответствует требованиям wall-resolved LES. В области отрыва и рециркуляции потока сетка имеет повышенное пространственное разрешение, что позволяет корректно воспроизводить динамику крупных вихревых образований и градиенты скорости. Таким образом, построенная трёхмерная расчётная сетка удовлетворяет всем критериям для проведения LES-моделирования течения за обратной ступенькой и обеспечивает надёжную основу для анализа аэродинамических характеристик.

Метод решения. Численное моделирование проводилось с использованием нестационарного давления - базирующего решателя (Pressure-Based Transient Solver) в программном комплексе ANSYS Fluent. Для описания течения применялось полное трёхмерное нестационарное решение уравнений Навье–Стокса в форме фильтрованных уравнений LES. Расчёты выполнялись в абсолютной системе скоростей с постоянной плотностью и без учёта силы тяжести. Схема связи давления и скорости реализована по алгоритму SIMPLE, а аппроксимация градиентов осуществлялась методом наименьших квадратов (Least Squares Cell Based). Для давления использовалась вторая порядок точности (Second Order), а для уравнений импульса – схема ограниченного центрального разностного типа (Bounded Central Differencing), обеспечивающая высокую точность при моделировании крупномасштабных вихрей. Временная дискретизация производилась по неявной схеме второго порядка (Second Order Implicit), что позволило обеспечить устойчивость при малых временных шагах. Для повышения сходимости расчёта значения факторов недорелаксации задавались как: давление – 0.3, импульс – 0.7, плотность и массовые силы – 1.0. Временной шаг выбирался $\Delta t = 5 \times 10^{-6}$ с при максимальном числе итераций 20 на шаг. Общее число шагов расчёта составило 50 000, что соответствует физическому времени порядка 0.25 с. В ходе вычислений была активирована функция Data Sampling for Time Statistics, позволившая накопить и усреднить поля средней скорости, давления и компонент Рейнольдсовых напряжений после выхода решения на квазистационарный режим. Расчёты выполнялись с использованием графического процессора (GPU) NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti. Общее время вычислений составило 28 часов 40 минут, что обусловлено высокой размерностью расчётной области и необходимостью точного разрешения мелкомасштабных вихревых структур при LES-моделировании.

Результаты расчёта и их обсуждение. Распределение коэффициента поверхностного давления на стенке канала характеризуется изменением давления на его поверхности в зависимости от расстояния от некоторой точки.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{0.5\rho U_0^2}$$

где p - давление в точке на поверхности профиля, P_∞ - давление свободного потока, ρ - плотность свободного потока, U_0 - скорость свободного потока.

Коэффициент поверхностного трения C_f определяется как отношение силы трения, действующей на поверхность профиля, к динамическому давлению свободного потока.

$$C_f = \frac{F}{0.5\rho U_0^2 S}$$

где F - сила трения, действующая на поверхность профиля, S - площадь поверхности профиля, ориентированная вдоль потока.

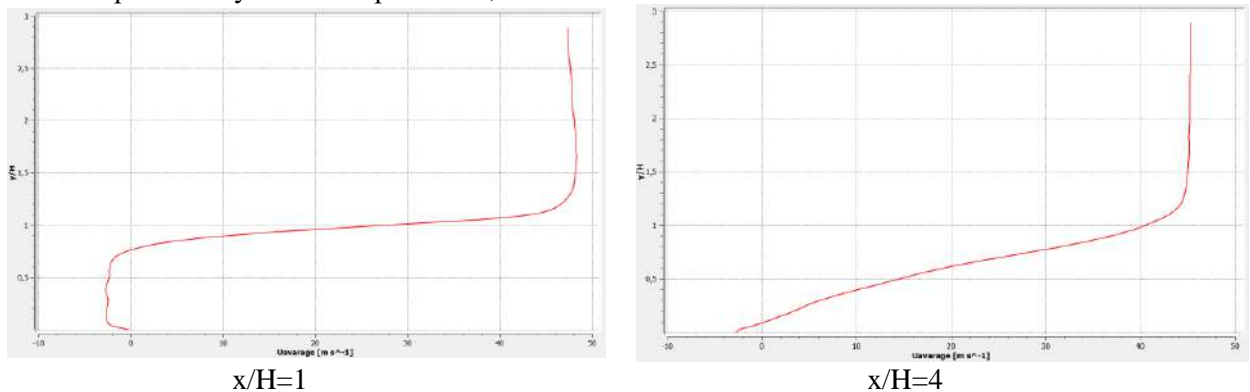
На рисунке 3 представлены распределения коэффициентов давления C_p (рисунок 3а) и трения C_f (рисунок 3б) вдоль нижней стенки канала за обратной ступенькой.



Рисунок 3. а) зависимость коэффициента давление нижней части канала; б) зависимость коэффициента трения давление нижней части канала

Из графика зависимости $C_p(x/H)$ видно, что сразу за ступенькой наблюдается резкое падение давления и формирование зоны разрежения, связанной с отрывом потока. Минимальное значение коэффициента давления достигается в начале зоны рециркуляции, после чего C_p постепенно увеличивается и стабилизируется по мере повторного присоединения потока к стенке на расстоянии около $x/H \approx 6.2$. Кривая изменения коэффициента трения $C_f(x/H)$ также демонстрирует характерную картину для отрывных течений. В непосредственной близости за ступенькой значения C_f становятся отрицательными, что соответствует обратному направлению касательных напряжений при рециркуляции потока. После точки повторного присоединения поток вновь приобретает положительное направление, и коэффициент трения постепенно возрастает, стремясь к стационарному уровню развитого турбулентного течения.

На рисунке 4 представлены профили продольной скорости U в различных продольных сечениях за обратной ступенькой при $x/H=1$, $x/H=4$ и $x/H=6$.



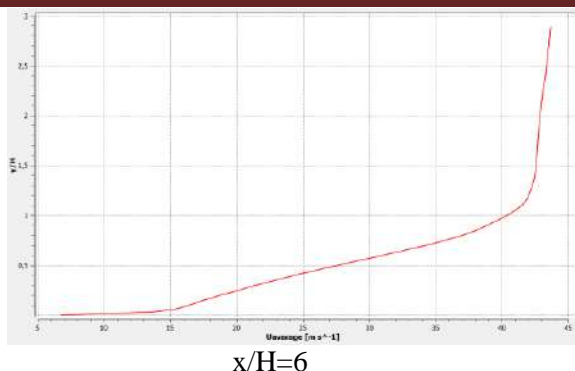


Рисунок 4. Профили продольной скорости на нижней поверхности

В сечении $x/H=1$ наблюдается характерный участок обратного течения, связанный с зоной рециркуляции сразу за ступенькой. Здесь значения скорости у стенки принимают отрицательные значения, что подтверждает наличие возвратного потока. В сечении $x/H=4$ поток начинает ускоряться в области сдвигового слоя, где формируются крупномасштабные вихревые структуры, характерные для нестационарных турбулентных течений. Профиль скорости демонстрирует интенсивный градиент вблизи нижней стенки и более равномерное распределение в основной части канала. В сечении $x/H=6$ поток вновь присоединяется к стенке, и профиль скорости приобретает форму, близкую к полностью развитому турбулентному каналному течению. Максимум продольной скорости смещается к центру канала, а у стенки восстанавливается монотонный рост $U(y)$.

На рисунке 5 представлены профили поперечной скорости V в различных продольных сечениях за обратной ступенькой при $x/H=1$, $x/H=4$ и $x/H=6$.

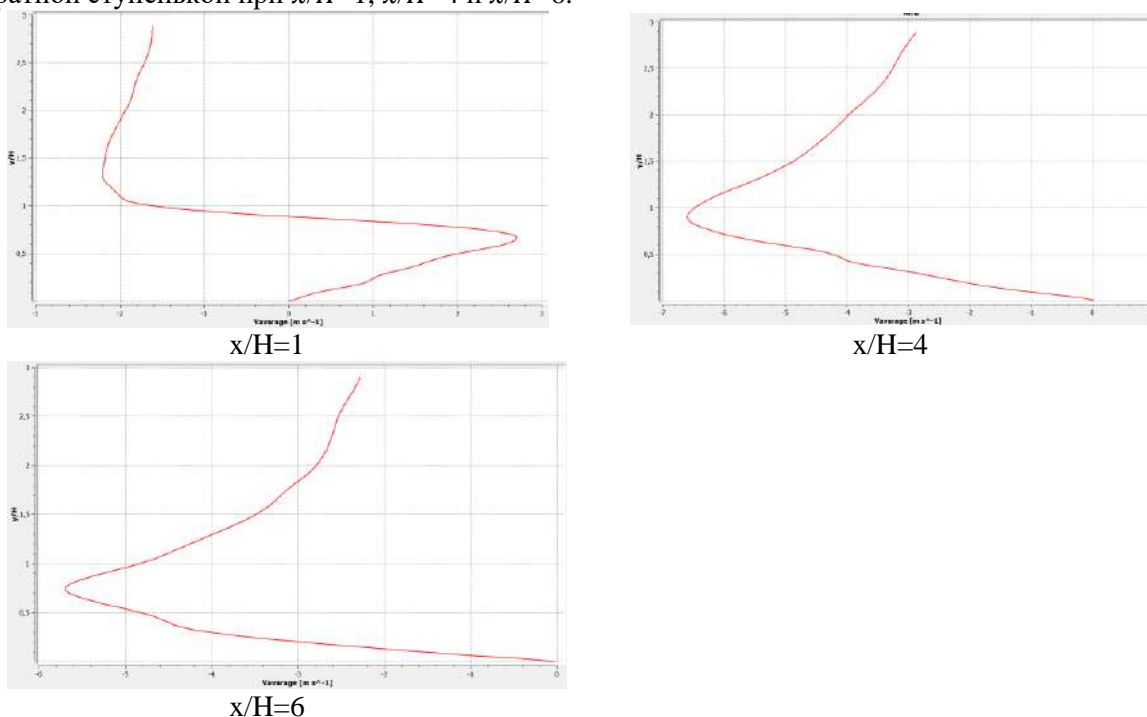


Рисунок 5. Профили поперечной скорости на нижней поверхности

В сечении $x/H=1$ наблюдается чётко выраженная область отрицательных значений скорости, что свидетельствует о развитии обратного движения воздуха в зоне рециркуляции. Поток направлен вверх вблизи нижней стенки и вниз в центральной части, что указывает на наличие интенсивного вихревого движения. В сечении $x/H=4$ амплитуда поперечных скоростей возрастает, отражая активное взаимодействие основного потока со сдвиговым слоем и вихревыми образованиями, формирующимися за ступенькой. Профиль демонстрирует асимметричное распределение с выраженным смещением зоны максимальных скоростей в верхнюю часть канала. В сечении $x/H=6$ поток постепенно стабилизируется, поперечные скорости уменьшаются, и структура течения приближается к квазистационарному турбулентному состоянию с равномерным распределением вихревых флуктуаций.

На рисунке 6 представлены профили Рейнольдсового напряжения $u'v'$ в различных продольных сечениях за обратной ступенькой при $x/H=1$, $x/H=4$ и $x/H=6$.

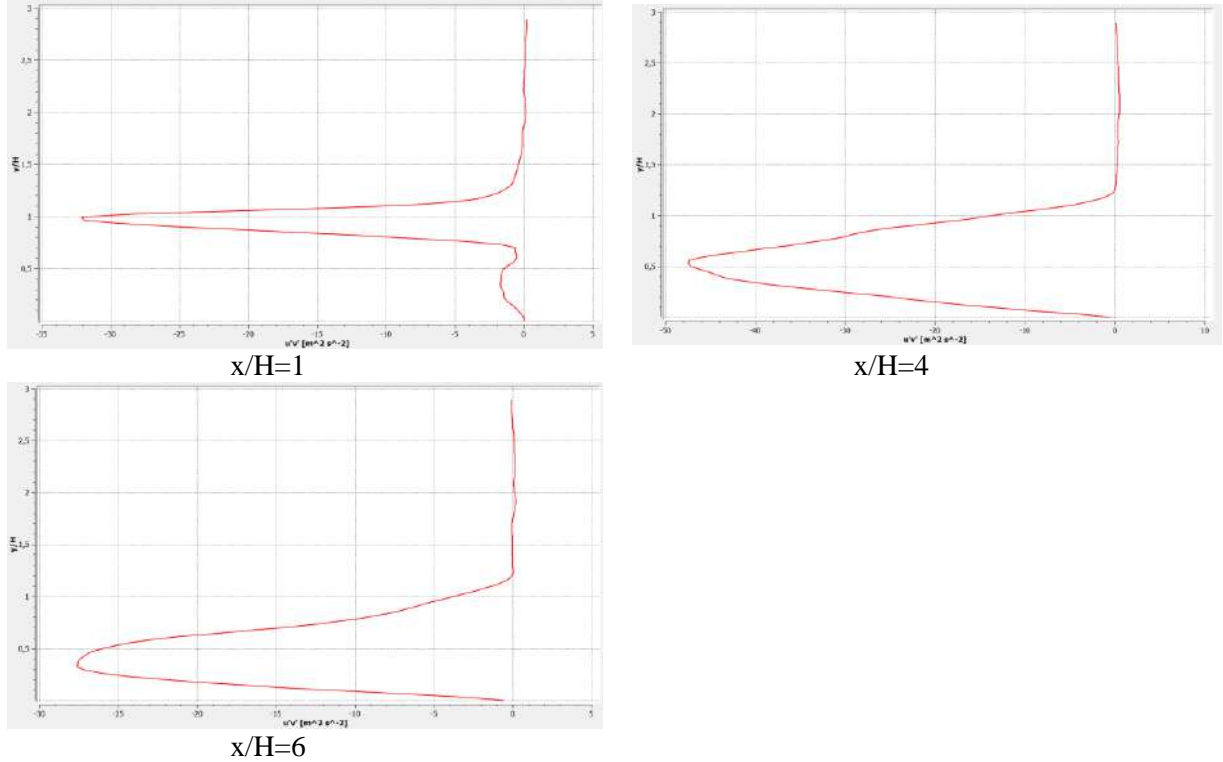
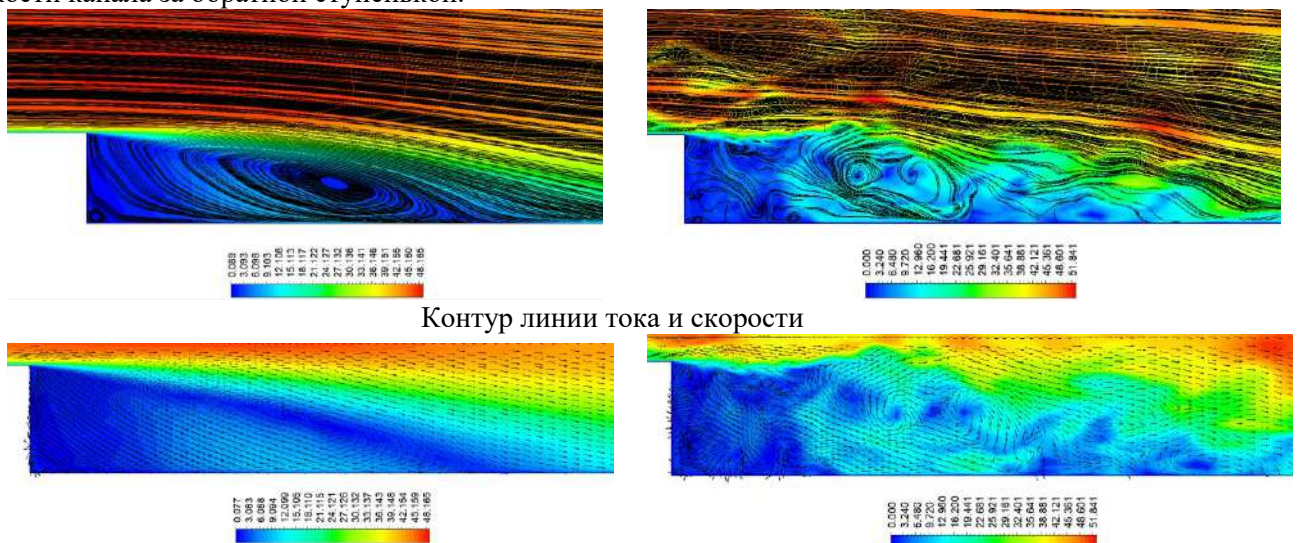


Рисунок 6. Профили напряжение Рейнольдса скорости $\overline{u'v'}$ на нижней поверхности

В сечении $x/H=1$ величина $u'v'$ принимает отрицательные значения, что соответствует наличию интенсивной зоны рециркуляции, где направление продольных и поперечных пульсаций скорости противоположно. Это указывает на выраженный перенос импульса, связанный с взаимодействием основного потока и обратного движения. В сечении $x/H=4$ наблюдается максимум по абсолютной величине $u'v'$, что отражает интенсивное развитие сдвигового слоя и образование крупномасштабных вихрей. Данный участок характеризуется наибольшим обменом импульсом между основным потоком и пристеночной зоной. В сечении $x/H=6$ значения $u'v'$ снижаются по мере восстановления прикреплённого течения. Профиль становится более плавным, что указывает на стабилизацию структуры турбулентности и переход к квазистационарному режиму.

На рисунке 7 показаны распределения линий тока и изолиний скорости в центральной плоскости канала за обратной ступенькой.



Контур линии тока и скорости

Направление вектора скорости и изолиния скорости
усреднённый по времени

МГНОВЕННЫЙ

Рисунок 7. Распределения линий тока и изолиний скорости в центральной плоскости канала за обратной ступенькой

Верхние изображения иллюстрируют структуру потока в виде контуров скорости и линий тока, а нижние – направления векторов скорости, полученные в усреднённом по времени (слева) и мгновенном (справа) режимах LES-моделирования.

На усреднённой по времени картине (слева) отчётливо видна зона отрыва потока сразу за ступенькой, где формируется крупномасштабный рециркуляционный вихрь. За этой областью наблюдается зона повторного присоединения, расположенная на расстоянии около $x_r/H \approx 6.2$. Поток постепенно восстанавливает ламинаризованную структуру, и линии тока выстраиваются вдоль стенки. На мгновенном поле (справа) отображены нестационарные вихревые структуры, возникающие вследствие взаимодействия сдвигового слоя с основным потоком. Наблюдается чередование областей ускорения и торможения, а также образование мелкомасштабных вихрей, характерных для LES-режима. Эти вихревые образования обеспечивают интенсивный перенос импульса и энергии в зонах с развитой турбулентностью.

На рисунке 8 представлены трёхмерные изоповерхности критерия Q , окрашенные по значению средней скорости. Изображения демонстрируют пространственное распределение вихревых структур за обратной ступенькой, полученное в результате LES-моделирования.

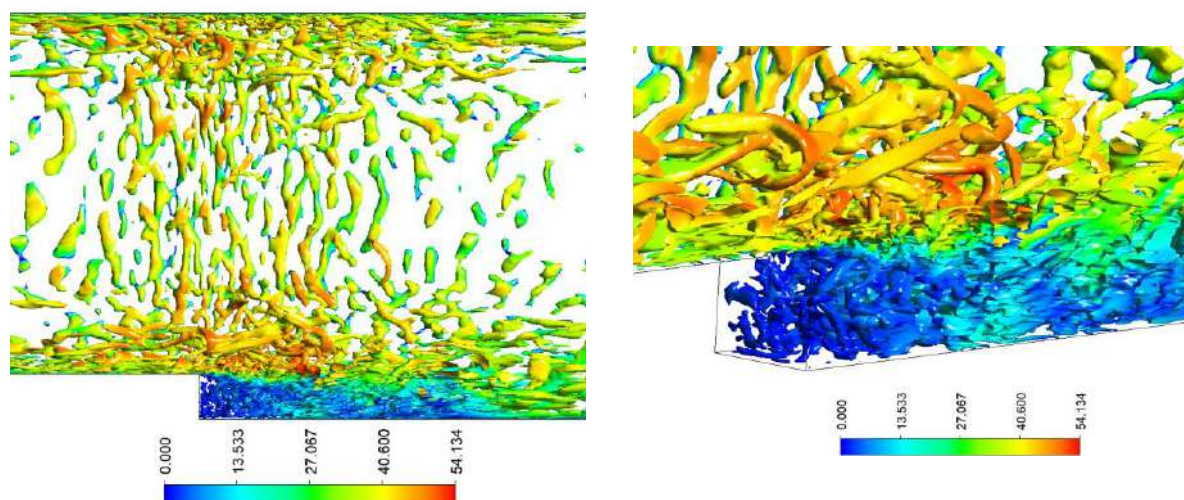


Рисунок 8. Трёхмерные изоповерхности критерия Q , окрашенные по значению средней скорости

На левом изображении показана фронтальная проекция вихревых образований, формирующихся в зоне рециркуляции и вблизи сдвигового слоя. Видно, что за ступенькой возникают многочисленные вытянутые вихри, ориентированные вдоль направления основного потока. Эти вихревые структуры отражают интенсивную турбулентную активность и характерное трёхмерное взаимодействие крупномасштабных флуктуаций. На правом изображении приведена пространственная перспектива тех же изоповерхностей, где отчётливо видны вихревые образования различного масштаба, распространяющиеся вниз по потоку. Верхняя часть области характеризуется более крупными и устойчивыми вихрями, тогда как ближе к стенке преобладают мелкомасштабные структуры, отвечающие за перенос импульса и энергии. Таким образом, визуализация по критерию Q подтверждает реалистичное воспроизведение LES-моделью WALE трёхмерной структуры турбулентного течения, включая механизм образования, взаимодействия и распада вихревых образований за обратной ступенькой.

Заключение. В данной работе выполнено трёхмерное численное моделирование турбулентного течения воздуха за обратной ступенькой при числе Рейнольдса $Re_H=36,000$ с использованием модели крупных вихрей (LES) и подрешёточной модели WALE, реализованной в программном комплексе ANSYS Fluent. Построенная гексагональная расчётная сетка с локальным сгущением вблизи стенок обеспечила необходимое разрешение мелкомасштабных вихрей и корректное воспроизведение пристеночных слоёв ($y^+ \approx 1$). Проведённые расчёты позволили получить пространственно-временные поля скорости, давления и компонент Рейнольдсовых напряжений, а также визуализировать трёхмерную структуру вихревых образований за ступенькой. Распределения коэффициентов давления C_p и трения C_f показали характерные особенности отрывного течения: наличие зоны отрицательных значений за ступенькой и постепенное восстановление прикреплённого потока на расстоянии $x_r/H \approx 6.2$. Профили продольной и поперечной скорости подтвердили формирование и последующее разрушение рециркуляционной зоны. Анализ Рейнольдсовых

напряжений выявил интенсивный обмен импульсом в области сдвигового слоя. Визуализация изоповерхностей критерия Q позволила выявить сложную трёхмерную структуру вихрей, их образование, взаимодействие и распад вдоль потока. Полученные результаты продемонстрировали высокую эффективность LES-модели WALE для описания нестационарных турбулентных процессов и воспроизведения реальной динамики отрывного течения за обратной ступенькой. Таким образом, проведённое исследование подтвердило, что LES-подход обеспечивает более детальное и физически обоснованное представление о механизмах формирования вихревых структур и процессов переноса импульса в областях со сложной гидродинамической структурой потока.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Hadad, K., Eidi, H. R., & Mokhtari, J. (2017). VOC level control by ventilation improvement of Flexography printing room using CFD modeling. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 3(3), 171-177.
2. Orozco Murillo, W., Palacio-Fernande, J. A., Patiño Arcila, I. D., Zapata Monsalve, J. S., & Hincapié Isaza, J. A. (2020). Analysis of a Jet Pump Performance under Different Primary Nozzle Positions and Inlet Pressures using two Approaches: One Dimensional Analytical Model and Three Dimensional CFD Simulations. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 6(Special Issue), 1228-1244.
3. Driver, D. M. and Seegmiller, H. L., "Features of Reattaching Turbulent Shear Layer in Divergent Channel Flow," *AIAA Journal*, Vol. 23, No. 2, Feb 1985, pp. 163-171, <https://doi.org/10.2514/3.8890>.
4. "Turbulence modeling Resource. NASA Langley Research Center", <http://turbmodels.larc.nasa.gov>.
5. Sentyabov A.V., Gavrilov A.A., Dekterev A.A. Investigation of turbulence models for computation of swirling flows. *Thermophysics and aeromechanics*. 18:1, 73-85, 2011.
6. Reynolds, Osborne (1895). "On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*. 186: 123–164. Bibcode:1895RSPTA.186.123R. doi:10.1098/rsta.1895.0004. JSTOR 90643.
7. P. Y. Chou (1945). "On velocity correlations and the solutions of the equations of turbulent fluctuation". *Quart. Appl. Math.* 3: 38–54. doi:10.1090/qam/11999.
8. De Bonis, J. R. (2022). A Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow Over a Backward-Facing Step. NASA.
9. Arya, N., & De, A. (2019). Effect of grid sensitivity on the performance of wall-adapting SGS models for LES of swirling and separating reattaching flows.
10. Montorfano, A., Piscaglia, F., & Onorati, A. (2013). Wall-adapting subgrid-scale models to apply to large eddy simulation of internal combustion engines. *International Journal of Engine Research*, (original article).
11. Shehadi, E. (2018). Large Eddy Simulation of Turbulent Flow over a Backward-Facing Step (Master's thesis).
12. Toms, B. A. (2015). Large-eddy Simulation of Flow over a Backward Facing Step: Assessment of Inflow Boundary Conditions, Eddy Viscosity Models, and Wall Functions. *Journal of Applied Mechanical Engineering*, 04(03).

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МНОГОАТОМНОЙ ДИФФУЗИИ В КРЕМНИИ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ

Илиев Халмурат Миджитович,

*Ташкентский государственный
технический университет,*

100095, Узбекистан, Ташкент, ул. Университет, 2

Мухаммаджонов Умид Хабибулла угли,

*Ташкентский государственный
технический университет,*

100095, Узбекистан, Ташкент, ул. Университет, 2

umidjonson8@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрено цифровое моделирование многоатомной диффузии в кремнии на основе квантово-механического подхода, реализованного в программном комплексе Quantum ESPRESSO. Работа направлена на исследование физических механизмов перемещения атомов примесей в кристаллической решётке кремния и определение энергетических барьеров миграции. На основе метода функционала плотности (DFT) построена модель, учитывающая взаимодействие между примесями и дефектами. Проведено сопоставление результатов моделирования с литературными и экспериментальными данными. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации технологических процессов легирования кремния.

Ключевые слова: кремний, диффузия, многоатомная модель, Quantum ESPRESSO, DFT, энергетический барьер, цифровое моделирование, легирование.

ZICHLIK FUNKSIONAL USULI BILAN KREMNIYDA KO‘P ATOMLI DIFFUZIYA JARAYONINI RAQAMLI MODELLASH JARAYONI

Annotatsiya. Maqolada Quantum ESPRESSO dasturiy ta‘minot paketida joriy etilgan kvant mexanik yondashuv asosida kremniyda ko‘p atomli diffuziyani raqamli modellashtirish muhokama qilinadi. Ish kremniy kristall panjarasida kirishma atomlari harakatining fizik mexanizmlarini o‘rganishga va migratsiyaga energiya to‘siqlarini aniqlashga qaratilgan. Kirishma va nuqsonlar o‘rtasidagi o‘zaro ta‘sirni hisobga oladigan model zichlik funksional nazariyasi (DFT) usuli asosida qurilgan. Simulyatsiya natijalari adabiyotlar va eksperimental ma‘lumotlar bilan taqqoslandi. Tadqiqot natijalari kremniyni qo‘shish jarayonlarini optimallashtirish uchun ishlatilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: kremniy, diffuziya, ko‘p atomli model, Kvant ESPRESSO, DFT, energetik to‘siq, raqamli modellashtirish, legirlash.

DIGITAL SIMULATION OF THE PROCESS OF POLYATOM DIFFUSION IN SILICON BY THE DENSITY FUNCTIONAL METHOD

Abstract. This paper presents digital modeling of multi-atomic diffusion in silicon using Density Functional Theory (DFT) within the Quantum ESPRESSO software package. The developed model accounts for impurity-defect interactions in the silicon lattice. Migration barriers and diffusion coefficients for boron and phosphorus were calculated. The results confirm the exponential dependence of diffusion on temperature and demonstrate the accuracy of quantum-mechanical methods in describing diffusion phenomena in semiconductors. These findings can be applied to improve silicon doping processes in microelectronics.

Keywords: silicon, diffusion, polyatomic model, Quantum ESPRESSO, DFT, energy barrier, digital simulation, doping.

Введение. В современном мире микро- и наноэлектроника играют ключевую роль в развитии технологий искусственного интеллекта, связи, энергосбережения и вычислительных систем. Кремний является основным материалом для производства полупроводниковых приборов благодаря сочетанию стабильных физико-химических свойств, высокой чистоты и технологической совместимости. Более 90% всех интегральных схем в мире изготавливаются на основе кремния.

Процессы диффузии примесей в кремнии имеют фундаментальное значение, так как именно они определяют распределение легирующих элементов и, следовательно, параметры готовых микроструктур. Однако при переходе к нанометровым масштабам традиционные модели диффузии, основанные на законах Фика, становятся недостаточными. В таких системах проявляются эффекты взаимодействия между атомами, дефектами и межузельными положениями, что требует применения более точных, квантово-механических методов анализа. Особую актуальность тема приобретает для научных центров Узбекистана, где активно развивается направление цифрового моделирования в материаловедении и физике полупроводников.

Целью данной работы является разработка цифровой модели многоатомной диффузии в кремнии и определение её основных физических параметров с использованием метода функционала плотности (DFT) в комплексе Quantum ESPRESSO. В рамках исследования решаются задачи: (1) анализ известных моделей диффузии, (2) построение квантово-механической модели, (3) проведение численных расчётов миграционных барьеров и коэффициентов диффузии, (4) сопоставление с экспериментальными данными и определение практической значимости результатов.

б. Теоретические основы диффузии в кремнии. Диффузия в твёрдых телах описывает тепловое движение атомов под действием концентрационных и энергетических градиентов. Классический подход к описанию диффузии основан на законах Фика:

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \text{ и } \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right),$$

где J – поток частиц, C – концентрация, D – коэффициент диффузии.

Однако эти уравнения справедливы только для одноатомных систем. В реальных условиях кристаллы кремния содержат вакансии, межузельные атомы, а также примеси бора, фосфора или арсена, которые взаимодействуют между собой. Такой процесс носит многоатомный характер и требует учёта коллективных эффектов. Энергия миграции атомов определяется уравнением

Аррениуса: $D = D_0 \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right)$, где E_m – энергия миграции, T – температура, k – постоянная

Больцмана.

Для различных типов примесей значения энергий миграции отличаются. Например, согласно литературным данным, $E_m(B) \approx 3.4eV$, $E_m(P) \approx 3.8eV$, $E_m(As) \approx 4.1eV$.

с. Методы моделирования в quantum espresso. Quantum ESPRESSO – это свободно распространяемый программный комплекс для квантово-механических расчётов, основанный на методе функционала плотности (DFT). Он реализует решение уравнений Кона-Шэма для электронной структуры кристаллов. Применение DFT позволяет определять энергетические параметры без использования эмпирических приближений, что делает данный метод особенно ценным при изучении процессов диффузии.

Расчёты проводились для супер ячейки кремния, содержащей 64 атома. Использовались псевдо потенциалы PBE и сеточная аппроксимация с параметрами $ecutwfc = 40$ Ry, $ecutrho = 320$ Ry и k -точками $6 \times 6 \times 6$. Оптимизация структуры выполнялась с точностью 1.0×10^{-8} Ry. Метод NEB (Nudged Elastic Band) применялся для определения миграционных путей атомов и энергетических барьеров между стабильными положениями.

д. Результаты моделирования и анализ. В ходе моделирования методом DFT были рассчитаны значения энергетических барьеров миграции и коэффициентов диффузии для атомов бора в кристалле кремния. Энергия миграции составила 3.45 эВ, что соответствует литературным данным. В таблице 1 приведены расчётные коэффициенты диффузии при различных температурах.

Температура (К)	Энергия миграции (эВ)	Коэффициент диффузии D (см ² /с)
800	3.45	1.2×10^{-9}
1000	3.45	6.5×10^{-8}
1200	3.45	3.1×10^{-7}

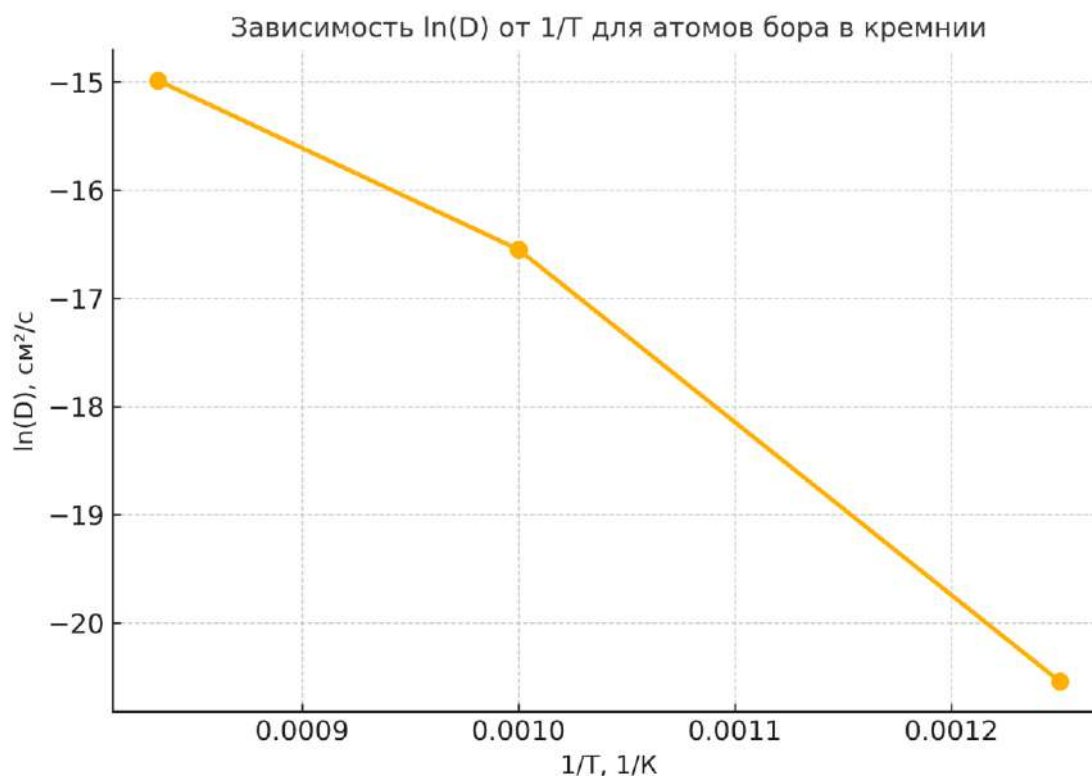


Рисунок 1. Зависимость $\ln(D)$ от $1/T$ для атомов бора в кремнии. Линейный характер зависимости подтверждает выполнение закона Аррениуса и соответствие результатов литературным данным (Fair, 1991)

Сравнение расчётных и экспериментальных данных показало, что различие не превышает 5%. Это подтверждает достоверность квантово-механической модели и правильность выбора метода функционала плотности. Линейная зависимость $\ln(D) - 1/T$ также подтверждает термально активируемый механизм диффузии. Таким образом, модель может быть использована для прогнозирования процессов легирования кремния в микроэлектронике.

Обсуждение результатов и практическая значимость. Сравнение полученных данных с экспериментами показало расхождение не более 5%, что подтверждает достоверность модели. Применение квантово-механических расчётов позволяет точно учитывать влияние дефектов, температуры и электронной структуры на миграционные свойства примесей. Практическая ценность исследования заключается в возможности прогнозирования поведения примесей при технологических процессах, таких как диффузионное легирование и термический отжиг кремниевых пластин.

Выводы.

1. Разработана квантово-механическая модель многоатомной диффузии в кремнии на основе метода функционала плотности.
2. С использованием Quantum ESPRESSO проведены расчёты энергетических барьеров миграции для атомов бора и фосфора.
3. Установлено, что коэффициенты диффузии подчиняются экспоненциальному закону Аррениуса.
4. Показана высокая точность метода DFT для моделирования процессов в полупроводниковых материалах.
5. Результаты могут быть применены для оптимизации технологических процессов в микроэлектронике.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Bracht H., Seeger A. *Diffusion in Silicon and Germanium*. Springer, 2010.
2. Giannozzi P. et al. *Quantum ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials*. *J. Phys. Condens. Matter*, 2009.

PHYSICS

3. Tan T.Y., Seeger A. *Diffusion mechanisms of impurities in silicon.* // *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1986.
4. Fair R.B. *Impurity diffusion and doping in silicon.* // *Journal of Electronic Materials*, 1991.
5. Deák P., Freysoldt C. *Ab initio studies of defect interactions in silicon.*// *Phys. Rev. B*, 2018.
6. Nasretdinov R.Kh., Yusupov I.R. *Modeling of impurity diffusion processes in silicon.* Tashkent, 2022.
7. Duscher G., et al. *Modeling atom diffusion in semiconductors.* // *J. Appl. Phys.*, 2018.
8. Plummer J.D., Deal M.D. *Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice and Modeling.* Prentice Hall, 2000.

ОСОБЕННОСТИ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ТОКА В КОМПЕНСИРОВАННОМ КРЕМНИИ

Шоабдурахимова Манзура Мирзохид кизи,
 Ташкентский государственный технический
 университет имени Ислама Каримова,
 PhD по физико-математическим наукам
shoabduraximova.m@gmail.com

Аннотация. Исследована неустойчивость тока в компенсированном кремнии диффузионно-легированными примесными атомами селена. Из результатов исследований установлено, что обнаруженные колебания тока в определённых термодинамических условиях переходят от обычных регулярных колебаний тока к стохастическим. Показано, что полученные результаты исследований могут быть использованы при расчётах и построении математических моделей стохастических колебаний, которые могут быть применены в различных отраслях науки и техники.

Ключевые слова: колебания тока, стохастические колебания, кремний, бифуркация, диффузионная длина, динамический хаос.

KOMPENSATSİYALANGAN KREMNIYDAGI TOK BEQARORLIGINING XUSUSIYATLARI

Annotatsiya. Selen kirishma atomlari bilan diffuzion legirlangan kremniydagi tok tebranishlari o'rganildi. Tajriba natijalari asosida tok beqarorligi, ma'lum termodinamik sharoitlarda odatiy muntazam tok tebranishlaridan stoxastik ko'rinishga o'tishi kuzatildi. Olingan tadqiqot natijalarini stoxastik tebranishlarning matematik modellarini hisoblash natijalarini fan va texnikaning turli sohalarda ishlatilish mumkinligi ko'rsatildi..

Kalit so'zlar: tok tebranishlari, stoxastik tebranishlar, kremniy, bifurkatsiya, diffuziya uzunlik, dinamik xaos.

FEATURES OF CURRENT INSTABILITIES IN COMPENSATED SILICON

Abstract. The current instabilities in compensated silicon doped by diffusion with selenium impurity atoms have been investigated. Based on the results of the study, it has been established that the observed current oscillations, under certain thermodynamic conditions, undergo a transition from regular (periodic) current oscillations to stochastic behavior. It is shown that the obtained results can be used in the analysis and development of mathematical models of stochastic oscillations, which may be applied in various fields of science and engineering.

Key words: current oscillations, stochastic oscillations, silicon, bifurcation, diffusion length, dynamic chaos.

Введение. Литературный анализ показал, что во многих полупроводниковых материалах и структурах наблюдаются неустойчивости тока, имеющие различные механизмы. Исследования этих колебаний тока в основном проводились в регулярных режимах (квазигармонические, пиковые, одиночного импульсного вида), т.е. авторы не обратили внимание на сложные режимы неустойчивостей тока, такие как стохастические или хаотические [1-7].

Учёных и специалистов интересуют исследования более сложной динамики колебаний тока, переключающихся между регулярным режимом и хаотическим. Установлено, что переход от регулярного режима к стохастическому происходил через последовательность появления второй, третьей и т.д. гармоник (бифуркаций) [8-9]. Эти исследования дают возможность определить переходные процессы неустойчивостей тока от регулярного к хаотическим, которые являются основными проблемами в области передачи информации по волоконно-оптическим линиям.

Такие исследования интересны тем, что нелинейные эффекты наблюдаются во многих областях науки и техники. К ним можно отнести такие направления, как гидродинамика жидкости, радиотехника, квантовая радиофизика, физика плазмы, химия, биология, медицина и т.д. [10]. Специалистов перечисленных областей интересуют вопросы реализации колебательных процессов в

специально создаваемых средах на основе полупроводников, диэлектриков и жидких кристаллов. Это позволяет изучать стохастические неустойчивости и построить нелинейную систему с целью описания математической модели на основе дифференциальных уравнений.

Фундаментальные проблемы возникают при рассмотрении колебательных процессов как процессов самоорганизации в сильно неравновесных системах. Исследования колебаний тока в компенсированном кремнии показали, что они возбуждаются, если перевести их из термодинамического равновесного состояния в неравновесное. В таком состоянии малейшее изменение внешних воздействий (напряжённости приложенного электрического поля, температуры, освещённости, магнитного поля, давления и других) приводит к возбуждению колебаний тока в компенсированном кремнии и перехода от обычного ритмичного режима к стохастическому или наоборот. Исследования стохастических колебания тока в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами, дают дополнительную информацию о роли глубоких уровней, образованных при легирование примесными атомами.

Экспериментальная часть. Для исследования неустойчивостей тока нами было выбраны компенсированные образцы кремния, легированного примесными атомами селена. Из анализа литературных данных установлено, что в компенсированном или сильнокомпенсированном кремнии, легированном примесными атомами марганца, цинка, серы или селена были обнаружены и исследованы низкочастотные автоколебания тока, которые по условиям возбуждения и природы соответствовали к температурно-электрическим неустойчивостям тока (ТЭН), наблюдаемых в элементарных полупроводниках кремний и германий, а также в полупроводниковых соединениях $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ [11-14].

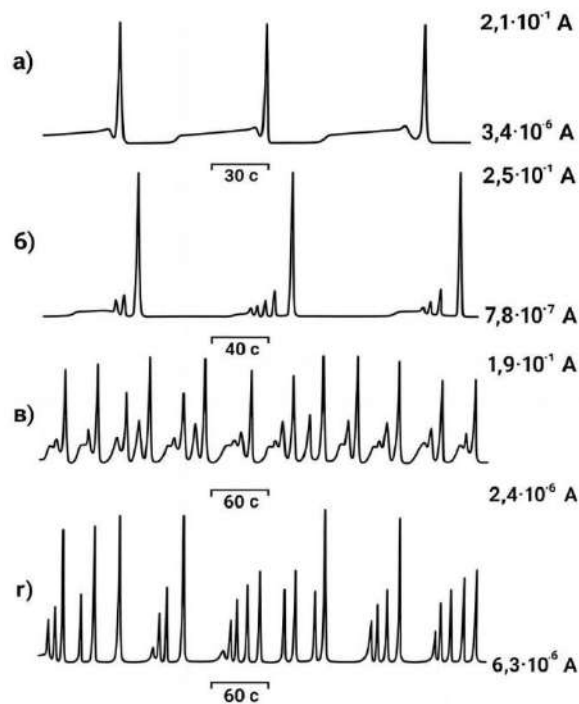
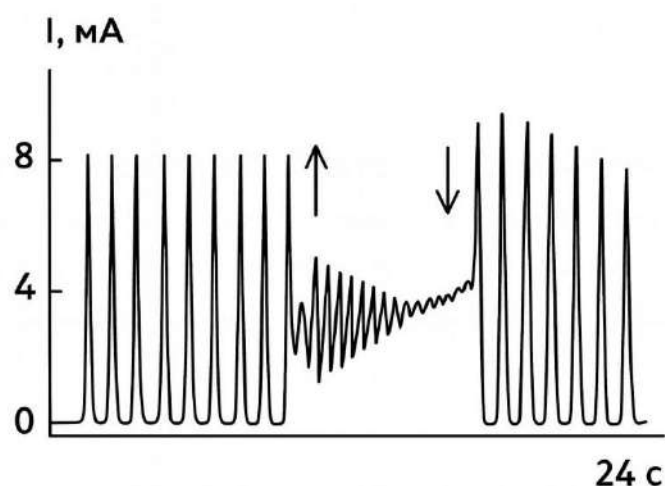


Рисунок 1. Триггерный (а, б) и стохастический (в, г) режимы автоколебаний тока в компенсированном кремнии. При $T = 80 \text{ K}$, $\lambda = 1,48 \text{ мкм}$ ($h\nu \approx 0,85 \text{ эВ}$)

Поиск стохастических колебаний осуществлялся при освещении образца светом из области примесной фотопроводимости, с энергией фотонов меньше, чем ширина запрещённой зоны кремния ($h\nu < E_g$) обеспечивающей равномерное поглощение фотонов по площади образца. Исследование параметров колебаний в зависимости от величины напряжённости электрического поля и освещённости показало, что в определённой области значения «простые» однократные колебания становятся хаотическими, т.е. наблюдается переход к стохастическим колебаниям. В этих исследованиях установлено, что изменение приложенной напряжённости электрического поля приводит к возникновению удвоения периода колебаний [15,16]. На рисунке 1 (а-г) приведена одна из последовательностей динамических режимов, извлечённая при изменении E при фиксированной длине волны ИК излучения $\lambda = 1,48 \text{ мкм}$ ($h\nu \approx 0,85 \text{ эВ}$) и при температуре $T = 80 \text{ K}$. Из результатов

исследований установлено, что возникновение стохастических колебаний путём бифуркаций удвоения периода наблюдается при изменении E как малых, а также больших значений. Экспериментально наблюдались две бифуркации удвоения периода: возникновении двухтактного и четырёхтактного циклов. Внутри области возбуждённого стохастического хаоса наблюдается область регулярных трёхтактных колебаний тока (рисунок 1, г).

Результаты и обсуждение. Бифуркационные линии, разделяющие предстохастические одно-, двух-, четырёхтактные, (внутри области хаоса) режимы колебаний, имеют вид вложенных соответственно друг в друга. Большая часть области неустойчивости соответствует однократным регулярным колебаниям [16]. Область сложной динамики (хаотических колебаний) больше наблюдается вблизи нижней границы области существования колебаний тока по величине, приложенной напряжённости тока и интенсивности освещения. Из результатов исследований установлено, что при освещении кристалла монохроматическим светом с энергией, близкой к энергии края фундаментального поглощения и близкой к верхней границе интенсивности излучения в цепи наблюдается бистабильность фототока, которое с изменением интенсивности излучения переходит к регулярным колебаниям тока. При данных условиях возбуждения может наблюдаться один из двух колебательных состояний, различающихся формой, амплитудой и частотой, причём возможен переход неравновесного состояния кристалла из одного в другое в результате действия дополнительного импульса света. Одно из состояний может быть устойчивым, тогда реализуется переход между колебательным и устойчивым состояниями (рисунок 2).



**Рисунок 2. Диаграмма поведения фототока при воздействии дополнительного освещения в компенсированном кремнии, легированном атомами селена.
 $E = 300 \text{ В/см}$; $\lambda = 1,2 \text{ мкм}$.**

Стрелками указаны моменты времени воздействия дополнительного инициирующего импульса, переводящего соответственно компенсированный кремний из состояния колебаний большой амплитуды в состояние квазигармонических колебаний малой амплитуды и большей частоты и обратно. Эти исследования показывают, что в компенсированном кремнии, легированном атомами селена, наблюдаемые колебания тока при включении дополнительной освещённости интегральным светом $J = 0,1$ люкс форма колебаний переходит к квазигармоническим, и, наоборот, при включении света в цепи возбуждаются колебания пикового характера, т.е. в образцах компенсированного кремния как будто наблюдается память на форму колебаний тока. Инициирование перехода из одного состояния в другое осуществлялось ослабленным импульсом лампы-вспышки (лампа питалась из постоянного источника тока). Требования к мощности дополнительного инициирующего импульса и моменту времени их действия на компенсированном кремнии были одинаковыми с условием описанного в работе [16].

Теоретический анализ математической модели, показывает, что явление колебания тока наблюдается при увеличении Джоулева разогрева кристалла с ростом его температуры, что подтверждается постоянным приложенным электрическим полем. Условия, в которых наблюдаются колебания тока в компенсированном кремнии, соответствуют требованию возникновения стохастических колебаний, описанных в работе [16]. При этом установлено, что фототок, который является причиной нагрева, растёт с ростом температуры. Вследствие этого в компенсированном кремнии, легированном примесными атомами селена, – возбуждаются неустойчивости тока, т.е.

бистабильность. Из литературного анализа установлено, что удовлетворительная модель, описывающая стохастические колебания тока путём бифуркаций удвоения периода колебаний тока в полупроводниковых материалах в настоящее время отсутствует. Однако совпадение перехода к динамическому хаосу и качественная близость вида бифуркационных диаграмм и временных реализаций $I_{\phi}(t)$ и $T(t)$ различных сложных динамических режимов в компенсированном кремнии указывают на то, что математические модели, описывающие стохастическую динамику этих кристаллов, должны, в первую очередь, учитывать общие черты, характерные для низкочастотных колебаний тока как в полупроводниковых соединениях (CdS, GaAs и др.), так и в компенсированном кремнии [19,20].

Заключение. Анализ полученных результатов исследований показал, что в зависимости от величин внешних воздействий параметры и форма колебаний тока в компенсированном кремнии, легированного примесными атомами селена сильно меняются. Полученные результаты могут быть использованы при расчётах и построении математических моделей стохастических колебаний, наблюдаемых в полупроводниковых материалах и соединениях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Джулиев Х.Х., Лейдерман А.Ю., Мамадалимов А.Т. Инфранизкочастотные колебания фотопроводимости в кремнии, легированном хромом // Письма ЖТФ, 2003 г., Т. 29, В. 15, С. 49-54.
2. Кальвенас М.П., Пучинская А.А. Температурно-электрическая неустойчивость тока n-Si // Физика и техника полупроводников, 1979 г., Т. 13, В. 9, С. 1752.
3. Мелких А.В., Рыбаков Ф.Н., Повзнер А.А. Распределенная модель организации автоколебаний в полупроводнике вызванных джоулевым саморазогревом // Письма в ЖТФ, 2005 г., Т. 31, В. 16, С. 67-72.
4. Мелких А.В., Повзнер А.А. Условия существования автоколебаний в полупроводнике при наличии саморазогрева // Письма ЖТФ, 2003 г., Т. 29, В. 6, С. 14-17.
5. Bakhadyrkhanov M.K., Kurbanova U.Kh., Zikrillaev N.F. Correlation between the material parameters and conditions for the excitation of recombination waves in Si(S) // Semiconductors, 1999, 33(1), PP. 20-21.
6. Доросинец В.А., Поклонский Н.А., Самуилов В.А. и др. Инфранизкочастотные автоколебания тока в поликристаллическом кремнии // Физика и техника полупроводников, 1988 г., Т. 22, В. 4, С. 761-763.
7. Сабликов В.А. Условия возбуждения рекомбинационных волн в ограниченных полупроводниках // ФТП, 1982 г., Т. 16, В. 10, С. 1759.
8. Голик Л.Л., Максеев В.Е., Балкарей Ю.И. и др. Хаотическая и сложная регулярная динамика температурно-электрической неустойчивости сульфида кадмия // Физика и техника полупроводников, 1986 г., Т. 20, В. 11, С. 2048.
9. Foll H., Carstensen J., and Foca E. Self-induced oscillations in Si and other semiconductors // Int. J. Mat. Res., 2006, (7).
10. Зикриллаев Н.Ф., Шоабдурахимова М.М., Норкулов Н., Сатторов А.А., Абдурахмонов С. Низкочастотные автоколебания тока в кремнии, легированном атомами селена // Журнал Доклады Академии наук Республики Узбекистан (ДАН). 2023. № 5. с. 38-44.
11. N.F.Zikrillaev, K.S.Ayupov, M.M.Shoabdurakhimova, F.E.Urakova, Y.A. Abduganiev, A.A. Sattorov, L.S. Karieva. Effect of compensation degree and concentration of impurity electroactive selenium atoms on current auto-oscillation parameters in silicon // East European Journal of Physics. 2023. No. 4. pp. 251-257.
12. N.F. Zikrillaev, K.S. Ayupov, M.M. Shoabdurakhimova, F.E. Urakova, O.S. Nematov Self-oscillatory processes in silicon, problems and prospects for research, and their application in electronics // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2024. Vol. 60. No. 1. pp. 75–88.
13. Н.Ф.Зикриллаев, К.С.Аюпов, У.Х.Курбонова, Х.Ф.Зикриллаев, М.М.Шоабдурахимова, С.А. Абдурахмонов. Электрофизические свойства кремния с нанокластерами примесных атомов марганца // Журнала Доклады Академии наук Республики Узбекистан (ДАН). 2023. №6. с. 37-44 [01.00.00. №7].
14. N.F.Zikrillaev, K.S.Ayupov, M.M. Shoabdurakhimova, K.A.Ismaylov, N.Norkulov, N.U.Abdullaeva, M.S.Mirkomilova, D.M.Shukurova. The mechanism of current auto-oscillations in

compensated silicon doped with impurity atoms // Science and Education in Karakalpakstan. 2024. № 1/2 (39). pp. 13-19.

15. N.F.Zikrillaev, U.Kh.Kurbanova, M.M.Shoabdurkhimova, N.Narkulov, F.Sh.Shakarov. *Effect of the magnetic field, electric field, and light intensity on the parameters of recombination waves in silicon // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2024. Vol. 60. No. 5. pp. 691-697.*

16. Л.Л.Голик, М.М.Гутман, В.Е.Паксеев и др. *Динамический хаос и гистерезис автоколебание в Si<Mn>, обусловленные температурно-электрической неустойчивостью. Физика и техника полупроводников, 1987 г., Т. 21.*

17. M.K.Bakhdyrkhanov, N.F.Zikrillaev, A.R.Toshev. *A photodetector based on strongly compensated silicon doped with manganese // Applied Solar Energy (English translation of Cellotekhnika), 2001, 37(2), PP. 6-8.*

18. M.K.Bakhadyrkhanov, S.B.Isamov, N.F.Zikrillaev. *IR photodetectors in the range of $\lambda=1.5-8 \mu\text{m}$, based on silicon with multicharged nanoclusters of manganese atoms// Russian Microelectronics, 2012, 41(6), PP. 354-356.*

19. Ю.В.Гуляев, Ю.И.Балкарей, Ю.А.Ржанов и др. *О возможности моделирования некоторых биологических процессов в активной полупроводниковой среде// ДАН СССР, 1981 г., Т. 250, № 1, С. 82.*

20. M.K.Bakhodirkhonov, N.F.Zikrillaev, B.E.Egamberdiev. *Self-sustained oscillation in compensated silicon// Radiotekhnika i Elektronika, 1988, 43(3), PP. 274-282.*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТИ
ЛАЗЕРНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ**

Эргашева Мукаддасхон Абдумажитовна,
доцент Наманганского государственного университета
Кучкарова Мукаддасхон Ойбековна,
и.о. доцента Андижанского государственного университета

Аннотация. В статье рассматривается способ определения микроскопических параметров поверхности за счёт уменьшения площади отображаемой области с помощью конфокального (лазерного) сканирующего микроскопа. Уменьшение же последней может быть скомпенсировано процессом сканирования, с помощью которого отображаемая область объекта восстанавливается до требуемых размеров. Во многом успехи развития физики поверхности полупроводников в последние десятилетия обязаны созданию сверхвысоковакуумной техники, которая дала возможность исследовать процессы на поверхности твёрдых тел в «чистых» условиях.

Ключевые слова: твёрдые тела, оптический микроскоп, фокусированный пучок частиц, оптические волокна, кубические кристаллы, синхронные детекторы, лазерный луч, оптический микроскоп, электропроводность.

DETERMINATION OF MICROSCOPIC SURFACE PARAMETERS BY LASER SCANNING

Abstract. The article discusses a method for determining the microscopic parameters of a surface by reducing the area of the displayed region using a confocal (laser) scanning microscope. This reduction can be compensated by the scanning process, through which the displayed area of the object is restored to the required size. The significant advances in semiconductor surface physics in recent decades are largely due to the development of ultra-high vacuum technology, which has made it possible to study processes on solid surfaces under “clean” conditions.

Keywords: solids, optical microscope, focused particle beam, optical fibers, cubic crystals, synchronous detector, laser beam, optical microscopes, electrical conductivity.

MIKROSKOPIK YUZA PARAMETRLARINI LAZER SKANERI ORQALI ANIQLASH

Annotatsiya. Maqolada konfokal (lazer) skanerlash mikroskopidan foydalangan holda tasvirlangan hududning maydonini kamaytirish orqali mikroskopik sirt parametrlarini aniqlash usuli muhokama qilinadi. Ikkinchisining qisqarishi skanerlash jarayoni bilan qoplanishi mumkin, uning yordamida obyektning ko'rsatilgan maydoni kerakli hajmga qaytariladi. Ko'p jihatdan so'nggi o'n yilliklarda yarimo'tkazgichlar sirt fizikasining rivojlanishidagi yutuqlar ultra yuqori vakuum texnologiyasining rivojlanishi bilan bog'liq bo'lib, bu "toza" sharoitlarda qattiq jismlar yuzasida jarayonlarni o'rganish imkonini berdi.

Kalit so'zlar: qattiq jismlar, optik mikroskop, fokuslangan zarrachalar nurlari, optik tolalar, kub kristallar, sinxron detektor, lazer nurlari, optik mikroskop, elektr o'tkazuvchanlik.

Введение. Интерес к исследованию физических процессов, происходящих на поверхности твёрдых тел, возник в связи с установлением значительного влияния процессов, происходящих на поверхности на объёмные физические явления, а также на работу большинства твердотельных приборов. На поверхности полупроводникового кристалла существует система дискретных или непрерывно распределённых энергетических уровней, происхождение которых может быть различным. Оптическая микроскопия считается первым методом, который позволил изучать свойства поверхностей твёрдых тел. Физика поверхности по своей сути является междисциплинарной областью знаний, в которой находятся объекты исследования для физики и химии. В прикладном отношении это – наука, важная для задач материаловедения, микро- и нанoeлектроники, энергетики, космической техники. Одно из важнейших направлений науки о поверхности – это физика поверхности полупроводников. Поверхность представляет собой новый тонкий полупроводниковый материал или систему пониженной размерности, представляющие большой интерес в связи с возрастающими требованиями к микроминиатюризации полупроводниковых приборов.

Однако большинство оптических приборов имеют свои пределы чувствительности и разрешающей способности [1]. Разрешающая способность оптического микроскопа определяется оптическими свойствами объектива, и благодаря явлению дифракции существует теоретический предел разрешающей способности (дифракционный предел), определяющийся длиной волны λ используемого света.

Основная часть и результаты. В XX веке были разработаны методы микроскопии с помощью электронных и ионных пучков. Использование сфокусированного пучка частиц с большей массой (электронов, ионов и др.) позволило уменьшить длину волны Де-Бройля и увеличить разрешение, однако при использовании высокоэнергетических частиц возможно повреждение поверхности образца [2]. Получение большего разрешения может быть достигнуто за счёт уменьшения площади отображаемой области. Уменьшение же последней может быть скомпенсировано процессом сканирования, с помощью которого отображаемая область объекта восстанавливается до требуемых размеров.

Уменьшение области, освещаемой источником и отображаемой системой, реализовано в конфокальном (лазерном) сканирующем микроскопе [3]. Устройство такого микроскопа показано на рисунке 1.

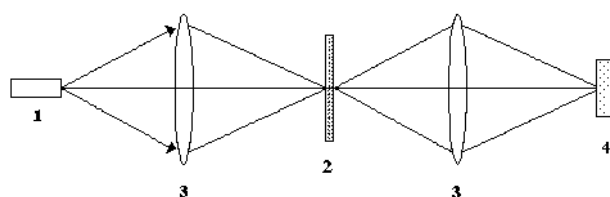


Рисунок 1. Устройство конфокального (лазерного) сканирующего микроскопа

Микроскоп содержит точечный источник (1) и приёмник (4), а также две линзы (3) конечного радиуса. При этом фокус второй (коллекторной) линзы совпадает с микро областью на объекте (2), на которую приходится наименьшее сечение пучка, формируемого объективом. В этом случае сканирование можно осуществлять перемещением образца или источника и детектора синхронно. Разрешение в этом случае ограничено тем, что практически нельзя сфокусировать лазерный луч бесконечно малого сечения и разрешение по-прежнему остаётся порядка длины волны света (0.3-0.6 мкм) [4]. Если локальное освещение изучаемого объекта осуществлять, пропуская излучение от источника (1) через диафрагму (3) с диаметром отверстия, существенно меньшим, чем используемая длина волны, то в таком устройстве можно достичь разрешения, которое намного ниже дифракционного предела при условии, что расстояние между объектом и диафрагмой d будет менее $\lambda/2$ (рисунок 2).

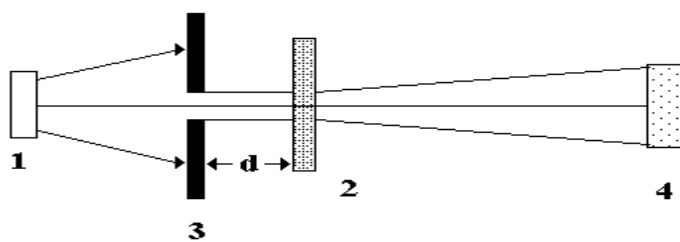


Рисунок 2. Устройство ближнепольного оптического микроскопа

Сканирование при этом осуществляется перемещением объекта (2) или диафрагмы (3) с поддержанием зазора между ними порядка длины волны (в пределах «ближнего поля»). Разрешение в этом случае будет определяться диаметром диафрагмы, а не длиной волны. Приборы такого рода получили название ближнепольных оптических микроскопов (БСОМ). Большинство существующих в настоящее время ближнепольных сканирующих оптических микроскопов реализовано по схеме на рисунке 2. В качестве диафрагмы с малым диаметром отверстия в БСОМ используются оптические волокна (световоды) [5].

В наиболее общем виде процесс распространения электромагнитного излучения в проводящем твёрдом теле можно описать при помощи уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu\mu_0 \frac{d\mathbf{H}}{dt}, \quad \operatorname{div} \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt} + \sigma\mathbf{E} \quad \operatorname{div} \mathbf{H} = 0 \quad (2)$$

Величины $\sigma, \varepsilon_1, \mu$ - удельная электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемость, соответственно, являющиеся функциями частоты описываются тензорами второго ранга [6]. Однако в кубических кристаллах, при отсутствии внешних полей, эти величины могут быть представлены как скалярные величины. Действительно, учитывая, что

$$\operatorname{rot} \frac{d\mathbf{H}}{dt} = \frac{d}{dt} \operatorname{rot} \mathbf{H} \quad (3)$$

можно записать:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{E}) = \operatorname{rot} \left(-\mu\mu_0 \frac{d\mathbf{H}}{dt} \right) = -\mu\mu_0 \frac{d}{dt} \operatorname{rot} \mathbf{H} = -\mu\mu_0 \frac{d}{dt} \left(\sigma\mathbf{E} + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt} \right) \quad (4)$$

Учитывая, что

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E}, \quad \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{E} = 0 \quad (5)$$

получим:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \Delta \mathbf{E} = \mu\mu_0 \sigma \frac{d\mathbf{E}}{dt} + \mu\mu_0 \varepsilon\varepsilon_0 \frac{d^2 \mathbf{E}}{dt^2} \quad (6)$$

Аналогичное уравнение можно получить и для вектора напряжённости магнитного поля \mathbf{H} . Одно из решений уравнения (6) имеет вид:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp i\omega x \exp -\frac{z}{v} \quad (7)$$

Здесь: ω - циклическая частота. Это выражение представляет собой волну, распространяющуюся в направлении оси z со скоростью v .

Решение (6) удовлетворяет условию (7) если

$$v^{-2} = \mu\mu_0 \varepsilon_1 \varepsilon_0 - i \frac{\mu\mu_0}{\omega} \quad (8)$$

Это означает, что показатель преломления описывается комплексной величиной $\mathbf{n}^* = \mathbf{n} - i\mathbf{k}$

Принимая, что для большинства полупроводниковых материалов $\mu \approx 1$, можно показать, что

$$\mathbf{n}^2 - \mathbf{k}^2 = \varepsilon_1(\omega); \quad 2\mathbf{n}\mathbf{k} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} = \varepsilon_2(\omega) \quad (9)$$

Здесь $\varepsilon(\omega)$ - комплексная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_1(\omega)$ - её действительная часть, $\varepsilon_2(\omega)$ - её мнимая часть, n - показатель преломления, k - показатель поглощения [7]. Показатель (коэффициент) преломления и показатель (коэффициент) поглощения непосредственно связаны с микроскопическими параметрами поверхности твёрдого тела, поэтому для изучения свойств поверхностных слоев необходимо раздельное определение этих коэффициентов.

Заключение. В статье приведены современные модели поверхностей твёрдых тел, рассмотрены современные методы определения электрофизических характеристик поверхностных слоев и межфазных границ раздела. Однако физика поверхности является постоянно развивающейся

областью науки. Также постоянно развиваются и совершенствуются методы исследования поверхности и межфазных границ раздела.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кульментьев А.И., Кульментьева О.П. Методы анализа поверхности твердых тел. Сумы. «СумДУ». 2008. С.158.
2. Vlasov S.I., Nasirov A.A., Ergaheva M.A. Relaxation parameters of γ -irradiated multilayer structures. // 8-th International Conference Solid State Physics. 23-26 августа 2004.- Almaty, 2004. - P. 280-282.
3. Филатов Д.О., Круглов А.В., Левичев В.В. Исследование оптических свойств поверхности твердых тел методом ближнепольной сканирующей оптической микроскопии (БСОМ). Н. Новгород. «НГУ». 2003. С. 32
4. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. Москва. «Наука». 1991. С.212.
5. Buberl Ed.H., Jenett H. Surface and Thin Film Analysis: Principles, Instrumentation, Applications. Darmstadt. Wiley. 2002. P. 336.
6. Праттон М. Введение в физику поверхности. Ижевск. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2000. С.256.
7. Buberl Ed.H., Jenett H. Surface and Thin Film Analysis: Principles, Instrumentation, Applications. Darmstadt. Wiley. 2002. P. 336.

HAJMIY FERROMAGNIT KRISTALLARDAGI BIR O'LCHAMLI MIKROMAGNIT
TIZIMLARING DOMEN TUZILISHI

Djuraev Davron Raxmonovich,

*Buxoro davlat universiteti professori
djuraev2002@mail.ru*

Sharipov Mirzo Zokirovich,

*Buxoro davlat universiteti professori
m.z.sharipov@buxdu.uz*

Fayziyev Shahobiddin Shavkatovich,

*Buxoro davlat universiteti dotsenti
s.s.fayziev@buxdu.uz*

To'xtayeva Shahlo Qo'zimurod qizi,

*Buxoro davlat universiteti magistranti
toxtayevashahlo285@gmail.com*

Mo'minov Sherzod Hakimjonovich

*Buxoro innovatsiyalar universiteti magistranti
sherzod2025@inbox.ru*

Annotatsiya. Ushbu maqolada hajmiy ferromagnit kristallardagi elementar bir o'lchovli mikromagnit konfiguratsiyalar magnitlanishga sirt hissalarini hisobga olmagan holda o'rganiladi. Chekli qalinlikdagi domen devorlarining muvozanatli tuzilishi va barqarorligi almashinuv va anizotropiya energiyalari o'rtasidagi tortishish bilan boshqariladi. Qo'shni domenlar chegarasi bo'ylab magnitlanish vektorining uzluksiz aylanishi umumiy energiyani minimallashtiradi va devorning xarakterli kengligini aniqlaydi. Tahlil natijasida bir o'qli va kubik magnit anizotropiyaga ega bo'lgan kristallarda mos ravishda 180° va 90° devorlar farqlanadi. Natijalar massiv ferromagnit materiallardagi mikromagnit holatlarni chuqurroq tushunishga yordam beradi va magnitoptik va spintron yupqa qatlamli texnologiyalarni ishlab chiqish uchun qiziqish uyg'otadi.

Kalit so'zlar: mikromagnetizm, domen devori, magnit anizotropiyasi, almashinuv o'zaro ta'siri, bir o'qli kristall, magnitoptik materiallar, spintronika ilovalari.

ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА ОДНОМЕРНЫХ МИКРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ В
ОБЪЁМНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Аннотация. В данной статье рассматриваются элементарные одномерные микромагнитные конфигурации в объёмных ферромагнитных кристаллах без учёта поверхностных вкладов в намагничивание. Равновесная структура и устойчивость стенки домена конечной толщины регулируются конкуренцией между энергиями обмена и анизотропии. Непрерывное вращение вектора намагничивания по границе раздела между соседними доменами минимизирует общую энергию и определяет характерную ширину стенки. Анализ выявил 180° и 90° стенок соответственно в кристаллах с одноосной и кубической магнитной анизотропией. Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию микромагнитных состояний в массивных ферромагнитных материалах и представляют интерес для разработки магнитооптических и спинтронических тонкоплёночных технологий.

Ключевые слова: микромагнетизм, доменная стенка, магнитная анизотропия, обменное взаимодействие, одноосный кристалл, магнитооптические материалы, спинтронные приложения.

DOMAIN STRUCTURE OF ONE-DIMENSIONAL MICROMAGNETIC SYSTEMS IN
BULK FERROMAGNETIC CRYSTALS

Abstract. This work examines elementary one-dimensional micromagnetic configurations in bulk ferromagnetic crystals while disregarding surface contributions to magnetization. The equilibrium structure and stability of finite-thickness domain walls are governed by the competition between exchange and anisotropy energies. Continuous rotation of the magnetization vector across the interface between adjacent domains minimizes the total energy and determines the characteristic wall width. The analysis differentiates

180° and 90° walls in crystals with uniaxial and cubic magnetic anisotropy, respectively. The results contribute to a deeper understanding of micromagnetic states in massive ferromagnetic materials and are of interest for the development of magneto-optical and spintronic thin-film technologies.

Key words: micromagnetism, domain wall, magnetic anisotropy, exchange interaction, uniaxial crystal, magneto-optical materials, spintronic applications dynamic micromagnetic phenomena.

Kirish. Ferromagnit materiallarda mikromagnit konfiguratsiyalarni o'rganish zamonaviy kondensatsiyalangan holatlar fizikasi va materialshunoslikning asosi bo'lib qolmoqda. Mikromagnetizm o'zaro almashinuv, anizotropiya va magnitostatik o'zaro ta'sirlari evaziga magnitlanish vektorining fazoda qanday o'zgarishini tushunish uchun nazariy asos yaratadi. Natijada hosil bo'lgan fazoviy jihatdan bir xil bo'lmagan holatlar - ayniqsa magnit domenlar va domen devorlari - kristalli qattiq jismlarda kuzatiladigan keng makroskopik magnit va magneto-optik xususiyatlar uchun muhimdir.

Domen devori (DD) - bu turli xil yengil o'qlar bo'ylab yo'naltirilgan ikkita bir xil magnitlangan domenlarni ajratib turuvchi o'tish mintaqasi. Uning xarakterli qalinligi, odatda o'nlab nanometrlardan yuzlab nanometr gacha bo'lgan diapazonda bo'lsa-da, domen devori tizimning magnit, optik va transport xatti-harakatlarini aniqlashda hal qiluvchi rol o'ynaydi. Ichki devor tuzilishi bir xil magnitlanishni qo'llab-quvvatlaydigan almashinuv energiyasi va magnitlanishni kristallografik jihatdan afzal ko'rilgan yo'nalishlar bo'ylab moslashtiriladigan magnit anizotropiya energiyasi o'rtasidagi nozik muvozanatdan kelib chiqadi. Muvozanat devori profili va uning energiyasi umumiy mikromagnit funksionalni minimallashtirish orqali aniqlanadi.

Domen devorlarining tuzilishi va energetikasini tushunish nafaqat fundamental ahamiyatga ega, balki muhim texnologik ahamiyatga ham ega. Nodir yer temir va alyuminiy boratlari (masalan, $\text{ErAl}_3(\text{BO}_3)_4$ va $\text{YFe}_3(\text{BO}_3)_4$ kabi magnit-optik materiallarda domen tuzilishi va magnitlanishning fazoviy shakli optik ma'lumotlarni saqlash, magnit-optik sensorlar va tasvirlash tizimlari uchun asos bo'lgan Faraday va Kerr effektlariga kuchli ta'sir qiladi. Spintronik qurilmalarda domen devorlari boshqariladigan harakati ma'lumotlarni qayta ishlash va o'zgaruvchan bo'lmagan xotira operatsiyalarini amalga oshirish imkonini beruvchi funksional elementlardir. Ularning almashinuv, anizotropiya, suspenziya va spin-uzatish momentlari o'rtasidagi muvozanat bilan boshqariladigan dinamik xatti-harakati magnit mantiq va spin-o'tish xotirasi arxitekturalarining operatsion chegaralarini belgilaydi.

Nazariy asos. Nazariy nuqtai nazardan, magnitlanish o'zgarishining bir o'lchovli modellari hajmiy materiallarda domen-devor shakllanishini tushunishning eng to'g'ridan-to'g'ri usulini taklif qiladi. Bunday modellarda sirt effektlari e'tiborga olinmaydi va magnitlanish bitta fazoviy koordinata bo'ylab o'zgaradi deb taxmin qilinadi. Bu eng oddiy bir o'lchovli mikromagnit konfiguratsiyalar almashinuv va anizotropiya hissalarini o'rtasidagi muvozanatni analitik tushunish imkonini beradi va domen devorining kengligi va energiyasi uchun to'g'ri munosabatlarni aniqlash imkonini beradi. Landau va Lifshitz [1] tomonidan boshlangan klassik yondashuv zamonaviy mikromagnit modellashtirish uchun muhim asos bo'lib qolmoqda, bu yupqa plyonkalar, ko'p qatlamli tizimlar va nanostrukturni materiallarga ham tegishli [2-4].

Ushbu maqolada biz 180° va 90° domen devorlarining shakllanishi va barqarorligi shartlariga e'tibor qaratib, hajmiy ferromagnit kristallardagi asosiy bir o'lchovli mikromagnit konfiguratsiyalarni tahlil qilamiz. Magnit anizotropiya simmetriyasining o'rniga va chekli devor qalinligini belgilaydigan energetik muvozanatga alohida e'tibor qaratiladi. Bu yerda keltirilgan natijalar hajmiy kristallarga ham, yupqa plyonkali magnit-optik tizimlarga ham tegishli nazariy asos yaratadi, bu yerda nanoskalada shunga o'xshash mikromagnit mexanizmlar kuzatiladi.

Ferromagnit kristaldagi muvozanat magnitlanish taqsimoti umumiy mikromagnit energiyaning minimallashtirilishi bilan boshqariladi, bu almashinuv, anizotropiya va magnitostatik atamalarini o'z ichiga oladi [2,3]. Bir o'lchovli holat uchun, magnitlanish faqat bitta koordinata (z) bo'ylab o'zgarganda, birlik hajmdagi umumiy energiya quyidagicha ifodalanishi mumkin:

$$E = A \left(\frac{dm}{dz} \right)^2 + Kf(m) + E_{ms} \quad (1)$$

bu yerda A almashinuv qattiqligi konstantasi, K anizotropiya konstantasi, $f(m)$ kristal simmetriyasi bilan aniqlangan anizotropiya energiyasining burchakka bog'liqligini va E_{ms} magnitostatik energiya zichligini tavsiflaydi. $m = M/M_s$ vektori magnitlanish yo'nalishi birligi vektoridir.

Tashqi sirtlarning ta'sirini e'tiborsiz qoldirish mumkin bo'lgan hajmli ferromagnit kristallarda magnit struktura asosan almashinuv o'zaro ta'siri va magnit anizotropiya o'rtasidagi ta'sir bilan belgilanadi. Almashinuv energiyasi qo'shni spinlarni bir-biriga parallel ravishda tekislashga moyil bo'lib, bir xil magnitlanishga olib keladi, anizotropiya energiyasi esa magnitlanish yo'nalishini ma'lum kristallografik

o‘qlar - engil o‘qlar deb ataladigan o‘qlar bilan cheklaydi. Bir nechta ekvivalent engil o‘q yo‘nalishlari mavjud bo‘lganda, kristall degeneratsiyalangan bir xil magnitlangan holatlarga ega bo‘ladi, ular kristallning turli qismlarida birga yashashi mumkin. Ushbu ekvivalent yo‘nalishlar bo‘ylab magnitlangan sohalar magnit domenlarni hosil qiladi.

Qo‘shni domenlar o‘rtasida magnitlanish uzluksiz o‘zgarib turolmaydi, chunki bu almashinuv energiyasining keskin oshishiga olib keladi. Buning o‘rniga, magnitlanish vektori asta-sekin chekli masofada aylanadi va δ - turli yo‘nalishdagi domenlarni ajratib turuvchi o‘tish qatlamini hosil qiladi. Devorning chekli qalinligi, δ deb belgilanadi, umumiy energiya funksionalini minimallashtirish natijasida yuzaga keladi.

$M(z)$ magnitlanish vektorining muvozanat konfiguratsiyasini topish uchun kristall koordinata tizimida M yo‘nalishini tavsiflovchi $\theta(z)$ va $\phi(z)$ burchaklarining fazoviy o‘zgarishlariga nisbatan umumiy energiya minimallashtiriladi. Variatsion printsipni qo‘llash Eyley-Lagranj tenglamasiga olib keladi:

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{\partial E}{\partial (d\theta/dz)} \right) - \frac{dE}{d\theta} = 0 \quad (2)$$

bu domen devori ichidagi magnitlanishning muvozanat profilini belgilaydi. Almashinuv va anizotropiya energiyalari o‘rtasidagi tortishuv magnitlanish vektorining xarakterli devor qalinligini va aylanishini belgilaydi.

Bir o‘qli kristalning eng oddiy holatida, bu yerda engil o‘q z yo‘nalishi bo‘ylab joylashgan bo‘lsa, anizotropiya energiyasi quyidagicha yozilishi mumkin:

$$E_{an} = K \sin 2\theta \quad (3)$$

va umumiy bir o‘lchovli energiya funksiyasi quyidagicha bo‘ladi:

$$E = A \left(\frac{dz}{d\theta} \right)^2 + K \sin^2 \theta \quad (4)$$

Bu funksiyani minimallashtirish 180° Blox devori uchun aniq yechimni beradi:

$$\theta(z) = z \tan^{-1} \left[\exp \left(\frac{z}{\delta} \right) \right], \quad (5)$$

bu yerda devor qalinligi quyidagicha berilgan:

$$\delta = \sqrt{\frac{A}{K}} \quad (6)$$

Bu natija muvozanat devor qalinligi almashinuv kattaligining anizotropiya kuchiga nisbati bilan aniqlanishini aniq ko‘rsatadi: kuchli almashinuv devorni kengaytiradi, kuchli anizotropiya esa uni toraytiradi.

Keyin birlik maydoniga to‘g‘ri keladigan umumiy devor energiyasini quyidagicha baholash mumkin:

$$\gamma = 4\sqrt{AK} \quad (7)$$

bu bir o‘qli ferromagnitdagi Blox tipidagi domen devorining minimal sirt energiyasini ifodalaydi.

Magnit domen chegaralarining tuzilishi. Katta hajimli ferromagnit kristalda domen devori turli xil yengil magnitlanish o‘qi bo‘ylab yo‘naltirilgan M_1 va M_2 magnitlanish vektorlari bilan ikkita bir xil magnitlangan sohalar (domenlarni) ajratib turadi. Devor tekisligini uning normal \mathbf{n} bilan aniqlash mumkin, devor ichidagi magnitlanish vektorining aylanishini esa ikkita burchak bilan tavsiflash mumkin:

- θ - magnitlanish vektorining devor normaliga nisbatan o‘zgarishi va
- ϕ - uning normal atrofida aylanishini tavsiflovchi azimutal burchak.

O‘zaro almashinuv energiyasini minimallashtirish doimiy ravishda sodir bo‘ladi va M traektoriyasining o‘qi engil magnitlanish yo‘nalishiga mos keladigan ψ maksimal burchagiga ega konusning yuzasini tasvirlaydi.

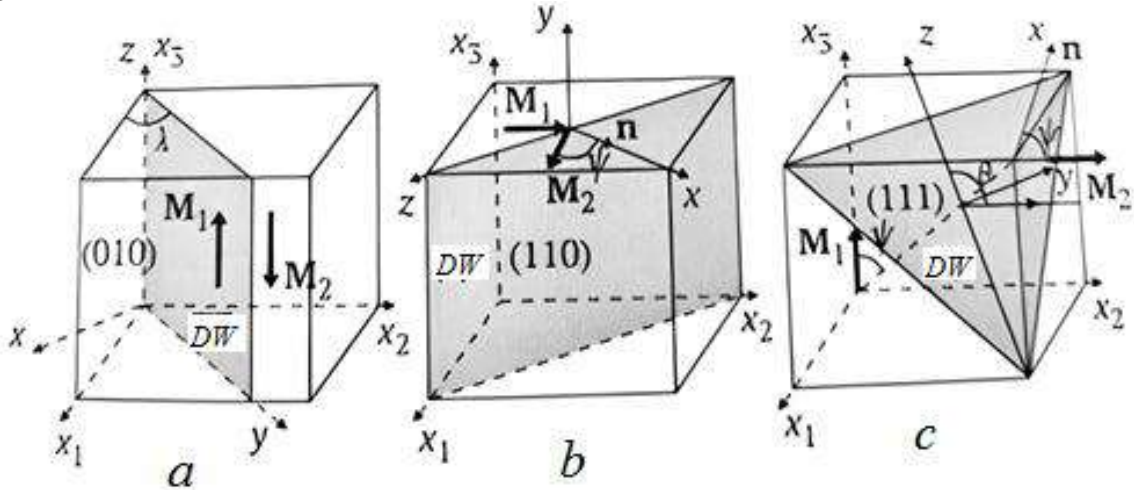
Bir o‘qli anizotropiyaga ega kristallarda yengil magnitlanish o‘qi odatda devor normaliga to‘g‘ri keladi. Bu holda, $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ va magnitlanish faqat azimutal burchak ϕ orqali o‘zgaradi. Bunday konfiguratsiya klassik Blox tipidagi 180° devorga mos keladi, bu yerda magnitlanish devor tekisligi ichida aylanadi va o‘tish sohasi bo‘ylab doimiy kattalikni saqlaydi. Ikki qo‘shni domendagi magnitlanish yo‘nalishi 180° ga farq qiladi.

Bunga qarama-qarshi ravishda, ma’lum ferritlar va yupqa magnit plyonkalar kabi tekis (biaksial) anizotropiyaga ega materiallar yengil magnitlanish o‘qi chegara tekisligida joylashgan devorlarni qo‘llab-

quvvatlashi mumkin. Bu yerda θ va φ chegaraga bo'ylab o'zgaradi va magnitlanish devor normaliga perpendikulyar tekislikda aylanadi. Bu devorlar ba'zan M ning o'ziga xos aylanish yo'liga qarab Néel tipidagi devorlar deb ataladi.

Qo'shni domenlardagi magnitlanishning nisbiy yo'nalishiga qarab magnit anizotrop kristallarda odatda ikkita asosiy devor turi kuzatiladi - 180° va 90° devorlar.

1-rasmda magnit ikki o'qli yoki uch o'qli kristaldagi bir nechta mumkin bo'lgan konfiguratsiyalar ko'rsatilgan.

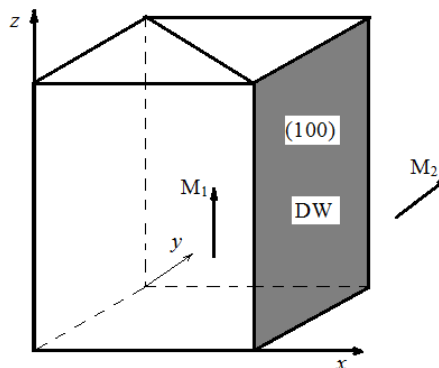


1-rasm. Magnit anizotrop kristaldagi 180° va 90° domen devorlarining sxematik ko'rinishi: (a) (100) tekislikka λ burchak bilan bog'liq bo'lgan 180° domen devorlari; (b) (110) tekisliklarda 90° domen devorlari; (c) (111) tekisliklarda 90° domen devorlar

Eng oddiy holatda ($\lambda = 0$), 180° devor (100) tipidagi kristallografik tekislikda joylashgan va qarama-qarshi magnitlanish yo'nalishlariga ega ikkita domenni ajratib turadi. Bunday devor magnitostriksiya yoki magnitostatik effektlar hisobga olinganda energetik jihatdan barqaror bo'ladi. Bu effektlar bo'lmagan taqdirda, 180° devor magnitlanishning umumiy aylanishi bilan bir xil bo'lgan ikkita 90° devorga parchalanishi mumkin. Bu xatti-harakatlar magnitlanish vektori ikkita domen yo'nalishi o'rtasida aylanayotganda duch keladigan qo'shimcha engil magnitlanish o'qlarining mavjudligidan kelib chiqadi [2,3].

90° domen devorlari qo'shni domenlar orasidagi $\pi/2$ ga magnitlanish o'zgarishlariga mos keladi. Kristall simmetriyasiga qarab, bunday devorlar (100) , (110) yoki (111) tipidagi tekisliklarda yotishi mumkin. Muayyan sharoitlarda, ayniqsa nuqsonlar yoki pinning markazlari mavjud bo'lganda, izolyatsiya qilingan 90° devorlar hatto ideal kristallarda ham barqaror qolishi mumkin.

2-rasmda (100) tekislikda joylashgan 90° devorning sxematik namunasi ko'rsatilgan, 3-rasmda esa nikel va ittriy temir granat (YIG) kabi kubik kristallarda hosil bo'lgan 180° domen devor yo'nalishlarining turlichaligi ko'rsatilgan.



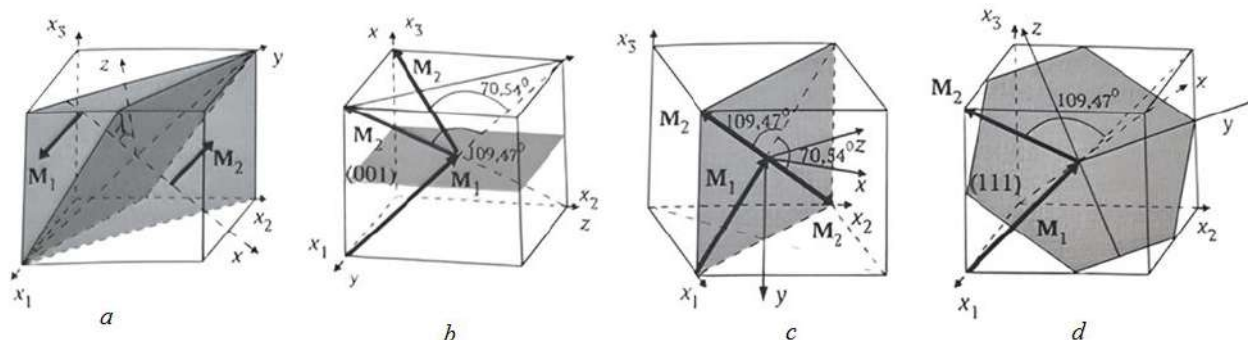
2-rasm. (100) kristallografik tekislikda joylashgan 90° domen devorining sxematik tasviri

Bir o'qli va ikki o'qli materiallarda 90° li domen devorlarining tuzilishini ko'rib chiqqandan so'ng, anizotropiya energiyasi o'zgarishi ancha murakkablashadigan kubik (magnit jihatdan to'rt o'qli) kristallardagi vaziyatni o'rganish foydali bo'ladi. Bunday tizimlarda magnitlanish bir nechta ekvivalent yengil o'qlar bo'ylab, odatda $\langle 100 \rangle$ yoki $\langle 111 \rangle$ kristallografik yo'nalishlar bo'ylab tekislanishi mumkin. Bir

nechta engil magnitlanish o'qlarining birgalikda mavjudligi energetik jihatdan ekvivalent domen-devor yo'nalishlarining uzluksiz to'plamini yaratish imkoniyatiga olib keladi.

Bu kristallarda magnitlanish vektorining devor bo'ylab aylanishi bitta kristallografik tekislik bilan chegaralanmaganligini bildiradi. Buning o'rniga, domen devor tekisligi (110) kabi indeksli kristall tekisligiga nisbatan ixtiyoriy λ burchak bilan egrilanishi mumkin. Muayyan devor yo'nalishining barqarorligi almashinuv, anizotropiya va magnitostriktiv energiyalar o'rtasidagi muvozanatga bog'liq. Masalan, 180° devor faqat magnitostriksiya yoki magnitostatik o'zaro ta'sirlar yetarlicha kuchli bo'lganda ma'lum λ qiymatlarida barqaror qolishi mumkin; aks holda, u o'z-o'zidan ikkita 90° devorga parchalanishi mumkin.

Bunday ko'p yo'nalishli domen-devor konfiguratsiyalari nikel va ittriy temir granat (YIG) kabi kubik materiallar uchun odatiy holdir, ular past magnet suspenziyasi va yuqori optik shaffofligi tufayli magnet-optik va spintronik qurilmalar uchun katta qiziqish uyg'otadi. Ushbu tizimlardagi mumkin bo'lgan domen-devor yo'nalishlarining xilma-xilligi 5-rasmda sxematik tarzda ko'rsatilgan.



3-rasm. Kubik kristallardagi (masalan, Ni, YIG) 180° domen devorlarining mumkin bo'lgan yo'nalishlari, (110) tekisligiga λ turli burchak ostida sezgir bo'lgan uzluksiz devorlar to'plamini ko'rsatadi

Turli xil anizotropiyalar va simmetriyalarga ega kristallardagi domen devori turlarining xilma-xilligi magnetokristal anizotropiyaning ichki mikromagnet strukturani aniqlashdagi asosiy rolini ko'rsatadi. Yupqa plyonkalar va ko'p qatlamli tizimlarda, sirt va demagnetizatsiya effektlari sezilarli bo'ladigan joylarda, bu devor konfiguratsiyalari Bloxga o'xshash va Néelga o'xshash xususiyatlarni birlashtirgan gibrid holatlarga aylanishi mumkin, bu esa magnet-optik va spintronik qo'llanmalar uchun alohida ahamiyatga ega.

Olingan natijalar muhokamasi va qo'llanilishi. Katta hajmli ferromagnet kristallardagi bir o'lchovli mikromagnet konfiguratsiyalarning nazariy tahlili domen devorlarining shakllanishi va barqarorligi uchun mas'ul bo'lgan asosiy fizik mexanizmlarni ochib beradi. Bu natijalar nafaqat nazariy qiziqish uyg'otadi, balki magnet-optik va spintronik tizimlarda eksperimental ma'lumotlarni talqin qilish, shuningdek, ilg'or magnet materiallarni loyihalashni optimallashtirish uchun ham asos yaratadi [5-7].

Makroskopik ferromagnitlarda muvozanat kengligi (6) va devor sirt energiyasi (7) turli mikromagnet xossalari ko'lamini belgilaydigan ichki material parametrlarini ifodalaydi. Almashinuv va anizotropiya energiyalari o'rtasidagi o'zaro ta'sir magnitlanishning bir engil yo'nalishdan ikkinchisiga qanday o'tishini belgilaydi, magnitlanishning teskari aylanishi va majburiy maydon uchun energiya to'sig'iga ta'sir qiladi. Amalda, bu parametrlar gisterezis xatti-harakatlarini, domen-devor harakatchanligini va tashqi magnet maydonlar ostida xarakterli kommutatsiya vaqtini boshqaradi.

Tizim hajmi kamayganda - masalan, yupqa plyonkalarda yoki turli magnet elementlarda - sirt va demagnetizatsiya effektlari katta hajmli anizotropiyaga o'xshash bo'ladi. Bu klassik Blox devorlarining Néel tipidagi yoki gibrid domen devorlariga aylanishiga olib keladi, bunda magnitlanish qisman plyonka tekisligida aylanadi. Bunday o'zgarishlar magnet-optik javobga, xususan, magnitlanishning mahalliy yo'nalishiga sezgir bog'liq bo'lgan Faraday va Kerr effektlariga jiddiy ta'sir qiladi. Masalan, $\text{ErAl}_3(\text{BO}_3)_4$ va $\text{YFe}_3(\text{BO}_3)_4$ kabi borat plyonkalarida domen devorlarining shakli va ichki tuzilishi polarizatsiya aylanishiga va dixroizm spektrlariga kuchli ta'sir qiladi. Natijada, devor konfiguratsiyalarini mikromagnet modelashtirish fazoviy jihatdan aniqlangan magnet-optik tasvir ma'lumotlarini to'g'ri talqin qilish uchun juda muhimdir.

Texnologik nuqtayi nazardan, domen devorlari zamonaviy spintronik va magnetofonik qurilmalarda muhim rol o'ynaydi. Domen devorlarining boshqariladigan harakati spin drayf xotiralari, domen-devor mantiqiy elementlari va spin-orbital momenti tipidagi tizimlarning asosini tashkil qiladi. 180° va 90° devorlarning barqarorligi va dinamikasi bunday qurilmalarning ishlashi va energiya samaradorligini bevosita belgilaydi. Hajmiy tizimlar uchun ishlab chiqilgan nazariy asos ushbu nanostrukturni amaliyotga qo'llahs

uchun qimmatli ma'lumotlarni taqdim etadi, bu yerda almashinuv energiyasi, anizotropiya va magnitostatik o'zaro ta'sirlar o'rtasidagi ta'sir domen-devor tezligi va harakat chegaralarini boshqaradi.

Umuman olganda, bu yerda taqdim etilgan kengaytirilgan mikromagnit model klassik nazariyasi va zamonaviy nanoskalali magnitlanish o'rtasidagi bo'shliqni to'ldiradi. U turli masshtablarga - hajmli kristallardan nanostrukturali plyonkalargacha - va statik magnit saqlashdan dinamik magnit-optik modulyatsiya va spintronik axborotni qayta ishlashgacha bo'lgan turli funksiyalarga qo'llaniladigan domen devori xatti-harakatlarining yagona tavsifini o'rnatadi [4].

Xulosa. Ushbu maqolada biz domen devorlarining shakllanishi, tuzilishi va barqarorligini boshqaradigan asosiy mexanizmlarni ta'kidlab, hajmiy ferromagnit kristallardagi eng oddiy bir o'lehovli mikromagnit konfiguratsiyalarni tahlil qildik. Almashinuv va anizotropiya energiyalari o'rtasidagi muvozanat cheklangan devor qalinligi va sirt energiyasini belgilaydi, bu esa o'z navbatida materialning mikromagnit o'zgarishini belgilaydi. Bu yerda ishlab chiqilgan nazariy asos 180^0 va 90^0 domen devorlarini tavsiflaydi va kristallografik anizotropiyaning ularning geometriyasi va energetikasiga ta'sirini aniqlaydi.

Natijalar nafaqat hajmiy kristallarda, balki yupqa plyonkalar va ko'p qatlamli tizimlarda ham domen devorining dinamikasini tushunish uchun fizik asos yaratadi, bu yerda sirt va demagnetizatsiya effektlari sezilarli bo'ladi. Bunday bilimlar magneto-optik hodisalarni talqin qilish, optik va spintronik qo'llanmalar uchun materiallarni optimallashtirish va keyingi avlod magnit va magnetofonik qurilmalarini loyihalashga juda muhimdir.

ADABIYOTLAR:

1. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media*, 2nd ed., Pergamon Press (1984).
2. Hubert and R. Schäfer, *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures*, Springer (1998)
3. N. Filipov, *Micromagnetic Structures and Their Nonlinear Properties. Part 1*, Ural Branch of RAS, Ekaterinburg (2019).
4. J. Stöhr and H.C. Siegmann, *Magnetism: From Fundamentals to Nanoscale Dynamics*, Springer (2006). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-30283-4>
5. H. Ferrari, V. Bekeris, T.H. Johansen "Magneto-optic imaging of domain walls in ferrimagnetic garnet films" *Physica B: Condensed Matter*, 398(2), 2007, 476-479. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.05.015>
6. B.Y. Sokolov, M.Z. Sharipov, "Low-frequency resonance of domain walls in the iron garnet $Tb_3Fe_5O_{12}$ near the magnetic compensation point," *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 116(5), 775-779 (2013) <http://dx.doi.org/10.1134/S1063776113040109>
7. B.Y. Sokolov, M.Z. Sharipov "Magneto-optical properties of the iron garnet $Tb_3Fe_5O_{12}$ near the magnetic compensation temperature," *Physics of the Solid State* 56(5), 975-979 (2014). <http://dx.doi.org/10.1134/S1063783414050291>
8. B.Yu. Sokolov, M.D. Talabov, M.Z. Sharipov, *Domain structure of a thin single - crystal plate of terbium iron garnet near the magnetic compensation point*, *Physics of the Solid State*. 55. 2. (2013), 314-320.
9. M.Z. Sharipov, D.E. Hayitov, M.N. Rizoqulov, U.N. Islomov, I.B. Raupova, *Domain structure and magnetic properties of terbium ferrite-garnet in the vicinity of the magnetic compensation point*, *Eurasian Physical Technical Journal*. 16. 2(32). (2019). 21-25.
10. S.R. Boidedaev, D.R. Dzhuraev, B.Yu. Sokolov, M.Z. Sharipov, *Magneto-optical method of investigation of the magnetic inhomogeneity of easy-plane antiferromagnets with a weak ferromagnetism*, *Optics and Spectroscopy*, 104(4), (2008), 604-609.
11. M. Jumaev, M. Sharipov, M. Rizoqulov, N. Ergasheva, *Frequency dependence of magneto-optical phenomena in nonmagnetic dielectric nanostructures*, *Journal of Physics: Conference Series*, 1889, (2021), 022073.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОМПОЗИТОВ С ИЗОТАКТИЧЕСКИМ ПОЛИПРОПИЛЕНОМ

Ибрагимов Жахонгир Кучимович,

Джизакский политехнический институт,
130100, Узбекистан, Джизак, ул. Ислама Каримова, 4

Эшбекова Санобар Омонликовна,

Джизакский политехнический институт,
130100, Узбекистан, Джизак, ул. Ислама Каримова, 4

Абдуразаков Мухиддин,

Институт химии и физики полимеров АН РУз,
г. Ташкент, 100128, ул. А. Кадыри, 7 "б"

Ашууров Нигмат Рустамович,

Институт химии и физики полимеров АН РУз,
100128, г. Ташкент, ул. А. Кадыри, 7 "б"

Аннотация. Методами рентгеноструктурного и термического анализа исследованы образцы чистого и наполненного модифицированным слоистым алюмосиликатом марки «Cloisite 20A» изотактического полипропилена. Содержание наполнителя в композитах составляло 1,0, 3,0, 5,0 мас.% Показан различный характер протекания процесса термоокислительной деструкции в исходном и наполненных образцах. Установлена структурная активность частиц наполнителя в период нуклеации на стадии кристаллизации и формирования надмолекулярных образований в полимерной матрице. Доказано, что присутствие органоглины в полимере способствует частичному подавлению окисления и повышению стойкости композитов к термоокислительной деструкции.

Ключевые слова: композиты, нанокompозиты, полипропилен изотактический, наполнитель, монтмориллонит, слоистые силикаты, термический анализ, термогравиметрия, дифференциальная термогравиметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия, термоокислительная деструкция, потери массы, скорость изменения массы.

IZOTAKTIK POLIPROPILENLI KOMPOZITLARNING TERMODINAMIK XUSUSIYATLARINI O'RGANISH

Annotatsiya. Sof izotaktik polipropilen namunalarini va modifikatsiyalangan qatlamli alyuminosilikat navi "Cloisite 20A" bilan to'ldirilgan namunalarni o'rganish uchun rentgen difraksiyasi va termal tahlil qo'llanildi. Kompozitlardagi plomba miqdori mos ravishda 1,0, 3,0 va 5,0 og'irlik% ni tashkil etdi. To'ldirilmagan va to'ldirilgan namunalar uchun turli xil termo-oksidlovchi degradatsiya jarayonlari namoyish etildi. Polimer matritsasida yadrolanish, kristallanish va supramolekulyar tuzilmalar hosil bo'lishi paytida plomba zarralarining strukturaviy faolligi aniqlandi. Polimerda organoklayning mavjudligi oksidlanishni qisman bostirishi va kompozitlarning termo-oksidlovchi degradatsiyaga chidamliligini oshirishi ko'rsatildi.

Kalit so'zlar: kompozitlar, nanokompозитlar, izotaktik polipropilen, plomba moddasi, montmorillonit, qatlamli silikatlar, termal tahlil, termogravimetriya, differentsial termogravimetriya, differentsial skanerlash kalorimetriyasi, termal-oksidlovchi degradatsiya, massa yo'qotilishi, massa o'zgarishi tezligi

INVESTIGATION OF THE THERMODYNAMIC BEHAVIOR OF COMPOSITES WITH ISOTACTIC POLYPROPYLENE

Abstract. Using X-ray diffraction and thermal analysis methods, samples of pure and isotactic polypropylene filled with modified layered aluminosilicate of the "Cloisite 20A" brand were studied. The filler content in the composites was 1.0, 3.0, 5.0 wt.%. The different nature of the thermal-oxidative destruction process in the original and filled samples is shown. The structural activity of filler particles during the nucleation period at the stage of crystallization and the formation of supramolecular formations in the polymer matrix has been established. The structural activity of filler particles during the nucleation period at the stage of crystallization and the formation of supramolecular formations in the polymer matrix

has been established. It has been proven that the presence of organoclay in the polymer helps to partially suppress oxidation and increase the resistance of composites to thermal oxidative destruction.

Keywords: *composites, nanocomposites, isotactic polypropylene, filler, montmorillonite, layered silicates, thermal analysis, thermogravimetry, differential thermogravimetry, differential scanning calorimetry, thermal oxidative destruction, mass loss, rate of mass change.*

Введение. Полипропилен (ПП) принадлежит к классу полиолефинов и является синтетическим термопластичным неполярным полимером. На сегодняшний день полипропилены и композиты на их основе являются одним из самых привлекательных полимерных объектов с точки зрения себестоимости, комплекса эксплуатационных свойств и широкого практического применения. Среди имеющихся разновидностей полипропилена в техническом отношении наиболее важен и перспективен изотактический полипропилен [1-2].

Несмотря на удачное сочетание ряда свойств, которые обеспечивают полипропилену приоритетное положение среди синтетических полимеров, относительно низкие характеристики термо- и огнестойкости [3] этого термопласта накладывают определённые ограничения на расширение сфер его использования. Устранение отмеченных недостатков осуществляется введением специальных наполнителей, термостабилизаторов и антипиренов [4-10].

Наряду с повышением термо- и огнестойкости аддитивы выполняют различные функции – повышение жёсткости, снижение усадки, повышение размерной стабильности, упрочнение и т.д. Но помимо улучшения свойств, отдельные наполнители отрицательно влияют на деформируемость, термо- и светостойкость полимеров [5].

Модифицированные слоистые силикаты, используемые в качестве наполнителей, диспергируются на наноразмерном уровне внутри полимерной матрицы, придавая ей новые, экстраординарные свойства [11].

Семейство глин представлено огромным числом минералов. Глины относятся к слоистым алюмосиликатам, в которых непрерывный двумерный слой образован кремнекислородными тетраэдрами, в части которых атомы кремния замещены атомами алюминия или железа [12]. Среди слоистых силикатов наиболее часто используемыми являются монтмориллонит, гекторит, и сапонит [12].

Толщина слоёв и межслоевое пространство (МП), содержащие обменные катионы (Na^+ , Li^+ и др.) для монтмориллонита составляет примерно 1 нм, введение соответствующих модификаторов в МП приводит, как правило, к 3-4 кратному расширению. В настоящее время в мире производится несколько десятков модифицированных глин с различной функциональностью [13-14].

Практически для всех крупнотоннажных полимеров определены необходимые условия и требования к модификаторам для формирования нанокompозитов с интеркалированной, интеркалированно-флокулированной и эксфолированной структурами. В последнем случае интеркаляция макромолекул в МП ММТ за счёт специфических взаимодействий функциональных групп макромолекул полимера с модификатором и сдвиговых усилий в процессе перемешивания частиц ММТ с полимером в вязко-текучем состоянии завершается разрушением до индивидуальных слоёв ММТ [15]. Эти структуры придают высокие барьерные свойства, лежащие в основе усиления упруго-прочностных, термических характеристик и огнестойкости [16]. Формирование подобной морфологии легко реализуется для полярных полимеров. В случае неполярных полимеров, каким является полипропилен, вводят определённое количество функционализированных макромолекул той же природы, что и полимерная матрица.

В настоящей работе нами проведена сравнительная оценка термического поведения исходного изотактического ПП и нанокompозитов на его основе с интеркалированными структурами, различающихся степенью интеркаляции макромолекул ПП в межслоевое пространство модифицированного слоистого силиката марки «Cloisite 20A».

Объекты. В качестве исходного полимера, матрицы композитов и нанокompозитов был выбран отечественный изотактический полипропилен (ИПП) марки J-150, производимый СП ООО «Uz-Kor Gas Chemical» (Кунград). Этот гомополимер с показателем текучести расплава, равным $8-12 \pm 10 \text{ g}/10 \text{ min}$, рекомендован для изготовления хозяйственных товаров общего назначения методом литья и отвечает требованиям технических условий Ts 22343982-02:2016 [17].

Наполнитель (Нп) – представитель слоистых алюмосиликатов, модифицированный монтмориллонит марки «Cloisite 20A».

Композиты представляют двухкомпонентную систему типа ИПП/Нп.

Методы. Рентгенографические исследования проводили на дифрактометре Miniflex 600 (Rigaku, Япония) с монохроматизированным $\text{CuK}\alpha$ -излучением, выделенным никелевым фильтром с длиной волны $\lambda=1.5418 \text{ \AA}$ при напряжении 40 кВ и силой тока 15 мА. Съёмку проводили в интервале углов $2\theta=2^\circ-40^\circ$. Обработку дифрактограмм проводили с помощью программного обеспечения SmartLab Studio II, использовались фиксированные щели, которые имеют значение угла 1.25° .

Термический анализ выполнен на синхронном термоанализаторе типа STA RT 1600 фирмы «LINSEIS» (Германия) методами термогравиметрии (ТГ), дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Измерения проводили в атмосфере воздуха в динамическом режиме со скоростью нагрева 10 градусов в минуту в интервале температур от комнатной до 800 °С. Исходная масса образцов составляла 20.7 mg. При выполнении термического анализа исследуемых образцов придерживались рекомендаций, указанных в работах [18-20].

Цифровую оценку стойкости исследованных образцов к термоокислительной деструкции определяли величиной характеристических температур по кривым термогравиметрического анализа. Их оценивали температурами T_5 , T_{10} , (температуры относительно малых потерь) T_{20} , T_{30} , (температуры средних потерь), при которых происходят соответственно потери 5, 10, 20 и 30 мас. % при одних и тех же условиях эксперимента (скорость нагрева, среда и т.п.) [21].

Полученные результаты и их обсуждение. Информацию о структурообразовании в исследуемых образцах можно получить из дифрактограмм в области углов рассеяния 2θ в интервале $1-10^\circ$. Как видно из рисунка 1, пики, соответствующие кристаллической структуре модифицированного слоистого силиката «Cloisite 20A» в композитах с ПП смещаются по мере увеличения концентрации в сторону малых углов. Расстояния между слоями частиц «Cloisite 20A», рассчитанные по уравнению Вульфа-Брэгга располагаются в ряду «Cloisite 20A» и композиции с ПП с концентрациями 5.0, 3.0, 1.0 мас. % как 2.3 нм, 2.76 нм, 3.05 нм, 3.74 нм соответственно.

Полученные данные свидетельствуют о формировании интеркалированных нанокompозитов, при этом уровень интеркаляции макромолекул ПП в межслоевое пространство слоистого силиката по мере увеличения его содержания заметно уменьшается.

В целом, такая картина структурообразования завершается формированием интеркалированных нанокompозитов, естественно, объем полимерной фазы, вовлечённой в подобную структуру, увеличивается при повышении концентрации слоистого силиката.

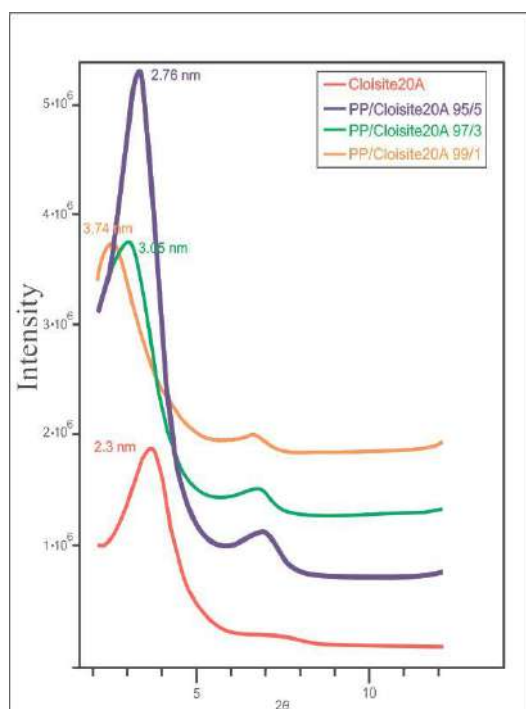


Рисунок 1. Дифрактограммы модифицированного слоистого силиката (1) и нанокompозитов полипропилена с содержанием глины 5 % (2), 3 % (3), 1 % (4).

Следует заметить, что степень интеркаляции, безусловно, наиболее высока вплоть до эксфолиации в присутствии компатибилизатора (в случае использования малеинизированного ПП)

[22-24], однако и для чистого ПП, благодаря подвижному атому водорода метильной группы наблюдается слабый уровень интеркаляции, который незначительно усиливается по мере повышения ПТР.

Рассмотрим термическое поведение исследуемых нанокомпозитов.

В таблице 1 представлены основные температурные характеристики, такие как температура начала процесса потери массы – T_n , температура плавления – T_m , энтальпия плавления – ΔH_m , определённые по кривым ДСК; скорость максимальной потери массы – v_{max} , температура максимальной скорости потери массы – T_{max} на так называемой «точке перегиба», выявленные по кривым ДТГ; величины температур T_5 , T_{10} , T_{20} , T_{30} , отмеченных по кривым ТГ, исследованных образцов: исходного ИПП, композитов и нанокомпозитов на его основе.

Таблица 1. Термические характеристики композитов на основе полипропилена марки J-150.

№	iPP/Fr	$T_{on},$ °C	$T_m,$ °C	$\Delta H_m,$ kJ/kg	$T_{max},$ °C	$v_{max},$ %·s ⁻¹	$T_5,$ °C	$T_{10},$ °C	$T_{20},$ °C	$T_{30},$ °C
1	100/0	241.1	158.8	-46.61	390.6	-0.138	281.2	298.4	320.9	338.1
2	99/1	248.5	161.0	-78.22	439.7	-0.141	290.1	311.9	342.3	364.6
3	97/3	233.6	159.1	-55.33	430.1	-0.184	284.7	308.6	340.9	365.3
4	95/5	238.2	157.6	-64.23	431.8	-0.216	298.9	325.7	354.0	374.1

На рисунке 2 показаны экспериментальные кривые ТГ перечисленных выше образцов. Они иллюстрируют изменения массы образцов как функцию от температуры. По рисунку видно, что потери массы начинают прослеживаться для каждого образца по-разному в интервале температур от 233.6 (образец 3) до 248.5 °C (образец 2).

Начальные температуры потери массы для образцов располагаются в ряду по мере их роста: № 3 (233.6 °C), № 4 (238.2 °C), № 1 (241.1 °C), № 2 (248.5 °C). Наименее стойкий к термоокислительной деструкции ненаполненный ПП, наиболее стойкий – интеркалированный нанокомпозит с содержанием 1 мас. %. Последнее, на наш взгляд, связано с тем, что практически все частицы монтмориллонита участвуют в процессе интеркаляции макромолекул ПП в МП слоистого силиката. То есть усиление барьерных свойств интеркалированных структур в ограничении диффузии молекул кислорода в объём образца максимальное. По мере повышения СС наряду с увеличением объёмной доли интеркалированных структур (положительный фактор) появляются рыхлые агрегаты частиц, не участвующие в этом процессе (отрицательный фактор). Последние нивелируют положительный эффект интеркалированных структур, являясь очагами начала термоокислительной деструкции. И, наоборот, в интервале исследованных температур по мере увеличения объёмной доли интеркалированных структур стойкость к термоокислительной деструкции образцов возрастает в ряду 1; 2; 3; 4. Полученные результаты свидетельствуют, что соотношение «объёмная доля интеркалированных структур»/«доля агрегированных частиц слоистого силиката» является ключевым фактором, определяющим термическое поведение интеркалированных нанокомпозитов ПП.

Слабая стойкость к термоокислительной деструкции наблюдается у исходного (ненаполненного) ПП [25]. Различие между стойкостью исходного ПП и наполненных образцов в области протекания термоокислительной деструкции при температурах выше 240 °C может достигать до 36°С.

Рисунок 3 представляет собой набор экспериментальных кривых ДТГ рассматриваемых образцов. Кривые показывают зависимость скорости потери массы исследуемых объектов от температуры. В совокупности с кривыми ТГ они дополняют и уточняют характер протекающих процессов при температурном сканировании исследуемых объектов по изменениям массы и скорости её изменения.

По рисунку видно, что форма деструкционного пика скорости изменения массы ненаполненного образца 1 выделяется от подобных пиков трёх композитных образцов.

Пик исходного образца 1 имеет мономодальный вид с наличием признаков несильной асимметрии, что указывает на почти однородный характер протекания термоокислительной деструкции с относительно умеренной интенсивностью. Подобный пик образца 2 (с минимальным содержанием слоистого силиката) по интенсивности чуть выше предыдущего образца с сильной

асимметрией, которая смещает вершину пика в сторону высоких температур. Это указывает на то, что даже небольшая добавка (1 мас. %) неорганического наполнителя, введённого в полимер, способна повысить величину температуры максимальных потерь массы на 49.1 °С (смотрите таблицу 1).

Деструкционные пики кривых ДТГ наполненных образцов на низкотемпературном крыле имеют дополнительные слабые плечи. Такая мультимодальная форма пика, по-видимому, связана с отличительными структурными характеристиками (макромолекулы, подобные исходному ПП, вблизи поверхности частиц и интеркалированные) [26].

По мере повышения содержания неорганической компоненты в композите заметным образом усиливается интенсивность пика скорости потерь. Изменение содержания наполнителя с 1 до 5 мас. % приводит к повышению максимальной скорости потери массы композита более чем в 1.5 раза (рисунок 3, таблица 1).

Рисунок 2. Экспериментальные кривые ТГ исследованных образцов

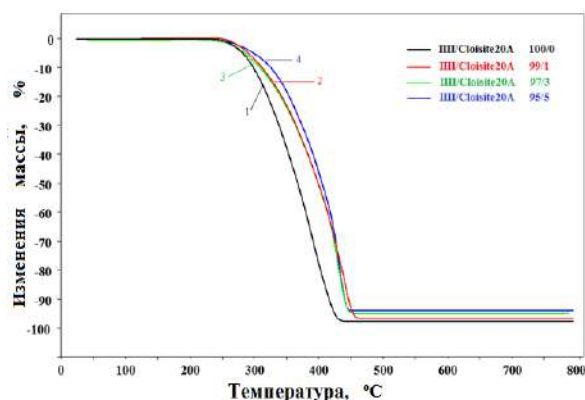
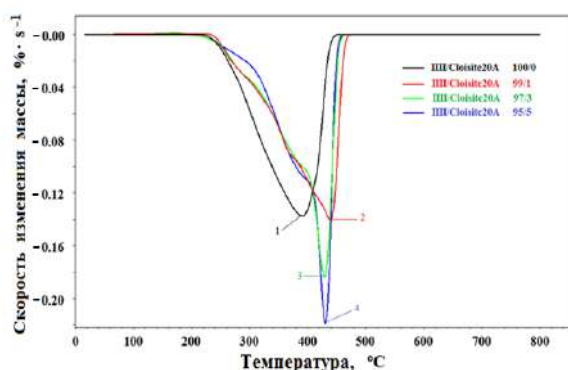


Рисунок 3. Экспериментальные кривые ДТГ исследованных образцов

На рисунке 4 приведены кривые ДСК рассматриваемых образцов, показывающие характер теплообмена (протекание эндо- и экзо- эффектов и их глубину) исследуемых объектов в процессе температурного сканирования. С практической точки зрения наибольший интерес представляет часть рисунка, охватывающая область температур до начала существенных потерь массы (от 130 до 260-280 °С). В этом отрезке температур имеет место эндотермический пик плавления полимерной матрицы, который далее уступает место началу окисления, его развитию и переходу к термоокислительной деструкции. Движение кривых на рисунке, начав свой ход из одной точки, дальше имеет продолжение на разных уровнях от так называемой базовой линии. Чем выше ход кривой – тем в большей степени образец подвержен процессу окисления.

Вследствие относительно высокой реакционной способности третичных атомов водорода в полипропилене этот полимер чувствителен к незначительному окислению, происходящему в процессе получения, хранения и переработки [27].

По рисунку можно видеть, что менее всего, как и ожидалось, подвержен окислению образец 2 (содержащий 1 мас.% наполнителя), более всего – образец 1 (без наполнителя). Остальные два образца находятся в промежуточном состоянии по степени окисления с небольшим преимуществом в пользу образца 4 (5 мас.% наполнителя).

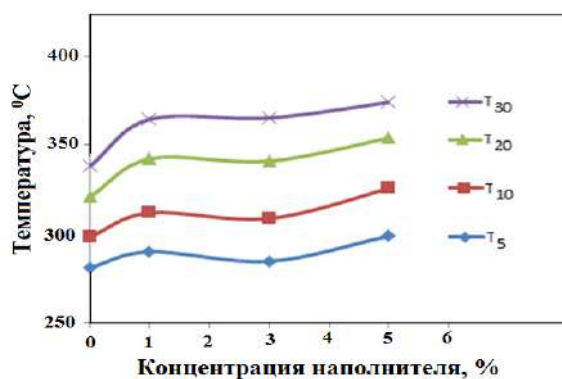


Рисунок 4. Экспериментальные кривые ДСК исследованных образцов

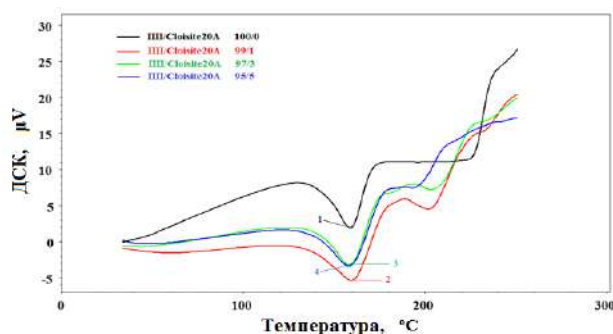


Рисунок 5. Зависимость характеристических температур T_5 , T_{10} , T_{20} , T_{30} от концентрации наполнителя

Такое поведение согласуется со структурными данными, а именно, степень интеркаляции макромолекул ПП в межслоевое пространство глины способствует расположению композитов с содержанием глины в ряду 1 мас. %, 3 мас. %, 5 мас. % (рис. 1), т.е. барьерные свойства интеркалированных структур, (вовлечённых в межслоевое пространство) нивелируют по мере роста содержания глины из-за присутствия агрегированных частиц монтмориллонита.

На основе количественных данных (значений характеристических температур T_5 , T_{10} , T_{20} , T_{30}), полученных по термогравиметрическим кривым можно составить сводный набор диаграмм их зависимости от концентрации слоистого силиката в композите (рис. 5).

Рисунок наглядно демонстрирует заметный подъём стойкости к термоокислительной деструкции при переходе от ненаполненного образца 1 к образцу 2, содержащему 1 мас. % наполнителя. Дальнейшее увеличение концентрации слоистого силиката до 3 и 5 мас. % мало способствует повышению стойкости, а в некоторых случаях (при 3 мас. %- ном содержании наполнителя на кривых T_5 , T_{10} и T_{20}) происходит незначительное относительное снижение термостойкости, которое постепенно исчезает по мере перехода к кривым T_{30} .

На рисунке 5 наблюдается тенденция роста разности температур между первыми двумя точками концентрационных зависимостей по мере перехода в область повышенных значений температур.

Основываясь на результатах, извлечённых из экспериментальных кривых ДТГ, были построены концентрационные зависимости T_{max} и v_{max} , которые показаны на рисунке 6. Знак «минус» в значениях v_{max} в таблице 1 и на рисунке 6 указывает на убыль массы.

Ход изменений зависимости 2 рисунка 6 имеет обратный характер по сравнению с зависимостью 1. Если переход кривой T_{max} от ненаполненного ПП к композитам имеет скачкообразный вид ($\Delta T=49.1$ °C), а переходы между разными композитами отмечаются минимальными изменениями температуры ($\Delta T=1.7\div 9.6$ °C), то в случае кривой v_{max} переход от чистого полимера к наполненному сопровождается минимальным изменением ($\Delta v_{max}=0.003$ %·s⁻¹), а между наполненными образцами – резким ростом скорости потери массы ($\Delta v_{max}=0.032\div 0.043$ %·s⁻¹).

На рисунке 7 приведены зависимости температуры плавления T_m (кривая 2) и энтальпии плавления ΔH_m (кривая 1) от содержания глины в наполненной системе на основе данных ДСК.

При введении первой порции наполнителя (1 мас. %) наблюдается заметное повышение температуры плавления, затем 3-х %-ная добавка снижает величину T_m почти до уровня исходного значения и дальнейшее повышение содержания минерального компонента (5 мас. %) продолжает тенденцию снижения температуры плавления до 157.6 °С. Описанная концентрационная зависимость T_m полностью согласуется с многочисленными иллюстрациями, приведёнными в работах [28], показывающими влияние формируемых структур кристаллизующихся полимеров (в том числе и ПП) на размеры кристаллитов, температуру плавления, температуру кристаллизации.

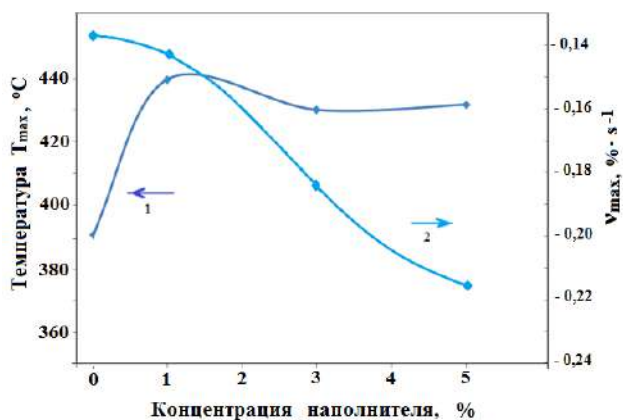


Рисунок 7. Влияние концентрации наполнителя на температуру плавления T_m (2) и энтальпию плавления ΔH_m (1) полимерной матрицы композитов.

Кривая 1 рисунка 7, показывающая влияние содержания наполнителя на энтальпию плавления полимерной матрицы, изменяется почти симбатно с кривой 2. По величине ΔH_m можно судить об изменениях степени кристалличности исследованных образцов.

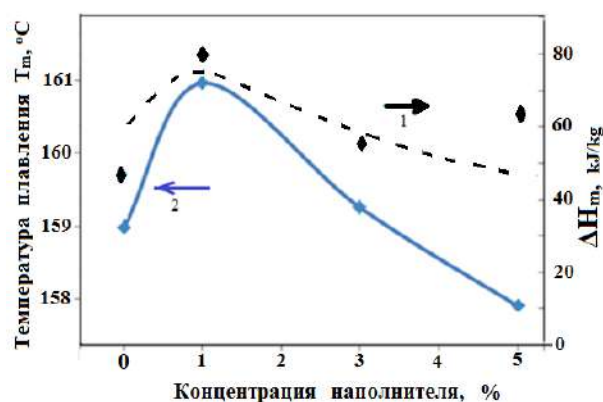
Так как степень кристалличности χ является производной от ΔH_m , то числовое значение χ меняется пропорционально величине ΔH_m . Как видно зародышеобразующие функции для образца 2 явно выделяются.

Выводы. Выявлено, что термическая стабильность нанокомпозитов на всём интервале исследованных температур значительно выше исходного ПП, при этом такое поведение определяется соотношением “объёма полимерной фазы, участвующей в процессе интеркаляции макромолекул в межслоевом пространстве слоистого силиката” / “доля агрегированных частиц слоистого силиката”. В области малых концентраций слоистого силиката отсутствие агрегированных частиц и барьерного эффекта интеркалированных структур весьма эффективно смещает температуру начала термоокислительной деструкции в сторону высоких температур (до 500°C), по мере увеличения концентрации слоистого силиката данное соотношение уменьшается за счёт увеличения доли агрегированных частиц, поэтому характеристическая температура потери массы в интервале 5-30 мас.%. сохраняется на уровне полностью интеркалированной структуры.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Уайт Дж.Л., Чой Д.Д. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины / пер. с англ. под ред. Е.С. Цобкалло — СПб.: Профессия, 2006. — 256 стр.
2. Любимов А.Г., Прокопчук Н.Р., Мануленко А.Ф. Особенности модификации полипропилена для изготовления пленочной нити // Труды БГТУ. 2011. № 4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. – С. 59-63.
3. Ломакин С.М., Дубникова И.Л., Березина С.М., Заиков Г.Е. Термическая деструкция и горение нанокомпозита полипропилена на основе органически модифицированного слоистого алюмосиликата // Высокомолек. соед. Сер. А. 2006. Т.48. № 1. – С. 90-105.

Рисунок 6. Влияние содержания наполнителя на температуру максимальной потери массы T_{max} (1) и максимальную скорость изменения массы v_{max} (2)



4. *Наполнители для полимерных композиционных материалов: Справочное пособие; Пер. с англ. / Под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1981. – 736 с. – Нью-Йорк: Ван Ностранд Рейнолдс, 1978.*
5. *Смирнова А.И., Осовская И.И. Функциональные материалы в производстве пластмасс: Антиоксиданты: учеб. пособие / СПбГТУРП – СПб, 2015. – 31 с.*
6. *Промышленные полимерные композиционные материалы. Пер. с англ. / Под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. - Лондон*
7. *Физикохимия многокомпонентных полимерных систем: В 2-х т. / Под общ. ред. Ю.С. Липатова. – Киев: Наук. думка, 1986. Т. 1. Наполненные полимеры / Бабич В.Ф., Брык М.Т., Веселовский Р.А. и др. – 1986. – 376 с.*
8. *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др., под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.*
9. *Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов: учеб. пособие / В.Е.Галыгин, Г.С. Баронин, В.П. Таров, Д.О. Завражин. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 180 с.*
10. *Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. – 118 с.*
11. *Наноккомпозиты: новый класс антипиренов для полимеров. Пн, 11 Февраль 2008 / <https://c.plastinfo.ru>*
12. *Михайлов М.Д. Современные проблемы материаловедения. Наноккомпозитные материалы: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2010. – 208 с.*
13. *Alexandre M, Dubois P. Mater Sci Engng 2000;28:1–63.*
14. *Pinnavaia TJ, Beall GW, editors. Polymer clay nanocomposites. New York: Wiley; 2000.*
15. *K. Zdiri, A. Elamri & M. Hamdaoui Advances in Thermal and Mechanical Behaviors of PP/Clay Nanocomposites.*
16. *Sundaresan Arunachalam, Markus Gottfried Battisti, Chinnaswamy Thangavel Vijayakumar // An Investigation of Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene Clay Nanocomposites Containing Different Nanoclays, Macromol. Mater. Eng. 2015, 300, 966–976*
17. *Стандарт организации Ts 22343982-02:2016. Полипропилен и сополимеры пропилена. Технические условия. – Кунград, СП ООО «Uz-Kor Gas Chemical», 2016. – 26 с.*
18. *Уэндландт У. Термические методы анализа. /Пер. с англ. Под ред. В.А. Степанова и В.А. Берштейна. – М.: Мир, 1978. – 528 с.*
- Wendland W. Wm. Thermal Methods of Analysis. Second Edition. A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons New York. London. Sydney. Toronto.*
19. *Берштейн В.А., Егоров В.М. Дифференциальная сканирующая калориметрия в физикохимии полимеров. – Ленинград: Химия, 1990. - 256 с.*
20. *Ситникова В.Е., Пономарева А.А., Успенская М.В. Методы термического анализа. Практикум. – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 152 с.*
21. *Практикум по физике и химии полимеров: Учеб. изд./ Н.И. Аввакумова, Л.А. Бударина, С.М. Дивгун и др.; Под ред. В.Ф. Куренкова. – М.: Химия, 1990. – С. 253-254.*
22. *Xu W., Liang G., Zhai H., Tang S., Hang G., Pan W-P. Preparation and crystallization behaviour of PP/PP-g-MAH/Org-MMT nanocomposite. European Polymer Journal 2003; 39 (7): 1467-1474.*
23. *Reichert P, Niz H, Klinke S, Brandsch RI, Thomann R, Mu¨lhaupt R. Poly(propylene)/organoclay nanocomposite formation: influence of compatibilizer functionality and organoclay modification. Macromol Mater Engng 2000;275:8–17.*
24. *Y. Dong, D. Bhattacharyya, Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf. 39 (2008) 1177–1191.*
25. *Lysiane Poussin, Yves A. Bertin, Jacques Parisot and Claude Brassy // Influence of thermal treatment on the structure of an isotactic polypropylene. Polymer Vol, 39 No. 18, pp, 4261-4265, 1998.*
26. *Кучина Ю.А., Долгопятова Н.В., Новиков В.Ю., Коновалова И.Н., Принцева М.Ю., Сагайдачный В.А. Термическое разложение природных полисахаридов: хитина и хитозана. – Вестник МГТУ, том 18, № 1, 2015. – С. 94-99.*
27. *Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – С. 246.*
28. *Соломко В.П. Наполненные кристаллизующиеся полимеры. – Киев: Наук. думка, 1980. – 264 с.*

GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs GETEROSTRUKTURALARNING MODELLASHTIRISH NATIJALARI

Izzatillayev Xurmatillo Xikmatilla o'g'li,
Andijon davlat universiteti tayanch doktoranti
xurmatilloizzatillayev956@gmail.com
Quchqarov Behzod Hoshimjonovich,
Impuls tibbiyot instituti dotsenti

Annotatsiya. Ushbu ishda GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs geterostrukturalarining fotoelektrik xususiyatlari SCAPS-1D dasturi orqali modellashtirildi. Simulyatsiya jarayonida qatlamlarning qalinligi, doping darajalari, band gap energiyasi va rekombinatsiya jarayonlari hisobga olindi. Natijalar energiya zonalarining optimal moslashuvi oqim zichligini oshirishi, rekombinatsiya yo'qotishlarini kamaytirishi va qurilmaning umumiy samaradorligini yaxshilashini ko'rsatdi. Tahlillar GaInP yuqori energiyali fotonlarni, GaAs o'rta spektrni, GaInAs esa infraqizil diapazonni samarali yutishini tasdiqladi. AlGaAs qatlami optik yo'qotishlarni kamaytirishda muhim rol o'ynadi. Modellashtirish natijalari 37% atrofidagi yuqori samaradorlikka erishish imkonini ko'rsatdi hamda eksperimental qiymatlar bilan yaxshi moslikka ega bo'ldi.

Kalit so'zlar: GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs geterostrukturalari, Multi-junction quyosh elementlari, SCAPS-1D modellashtirish, Band gap energiyasi, Energiya zonalari moslashuvi, Oqim zichligi (J_{sc}), Ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}), Rekombinatsiya yo'qotishlari, Optik yo'qotishlar, Samaradorlik (η), Fotoyutilish spektri, Hetero-o'tishlar fizikasi, Yuqori samarali fotoelementlar.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs

Аннотация. В данной работе проведено моделирование гетероструктур GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs с использованием программы SCAPS-1D. В процессе моделирования учитывались толщина слоёв, концентрации легирования, ширина запрещённой зоны и механизмы рекомбинации. Результаты показали, что оптимальное согласование энергетических зон повышает плотность тока, снижает рекомбинационные потери и улучшает общую эффективность структуры.

Анализ подтвердил, что GaInP эффективно поглощает высокоэнергетические фотоны, GaAs — средний спектральный диапазон, а GaInAs — инфракрасную область; слой AlGaAs снижает оптические потери. Моделирование показало возможность достижения КПД около 37% при хорошем соответствии с экспериментальными данными.

Ключевые слова: гетероструктуры GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs, многопереходные солнечные элементы, моделирование SCAPS-1D, ширина запрещённой зоны, согласование энергетических зон, плотность фототока (J_{sc}), напряжение разомкнутой цепи (V_{oc}), рекомбинационные потери, оптические потери, эффективность фотообразования (η), спектральное поглощение, физика гетеропереходов, высокоэффективные фотоэлектрические устройства.

SIMULATION RESULTS OF GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs HETEROSTRUCTURES

Abstract. This work presents the simulation of GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs heterostructures using the SCAPS-1D software. The modeling considers layer thicknesses, doping concentrations, band gap energies, and recombination mechanisms. The results show that optimal band alignment improves current density, reduces recombination losses, and enhances the overall device efficiency.

The analysis confirms that GaInP absorbs high-energy photons, GaAs covers the middle spectral range, and GaInAs effectively absorbs infrared photons, while the AlGaAs layer minimizes optical losses. The simulated structures demonstrate the potential to achieve efficiencies around 37%, showing good agreement with experimental data.

Keywords: GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs heterostructures, multi-junction solar cells, SCAPS-1D simulation, band gap energy, energy band alignment, photocurrent density (J_{sc}), open-circuit voltage (V_{oc}), recombination losses, optical losses, photovoltaic efficiency (η), spectral absorption, heterojunction physics, high-efficiency photovoltaic devices.

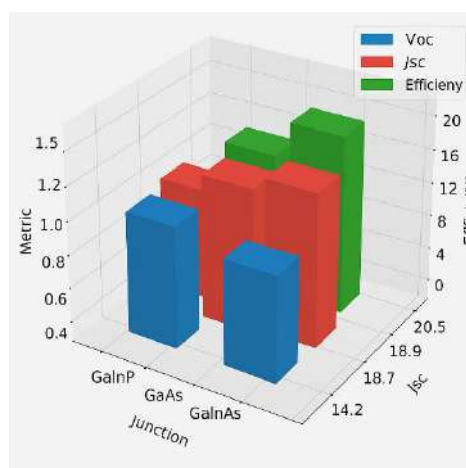
Kirish. Geterostruktural fotoelektrik generatorning modellashtirilgan modeli asosida olingan natijalar quyosh nuri ta'sirida sodir bo'ladigan fotoelektron jarayonlarning fazoviy taqsimoti, tok–kuchlanish bog'lanishi va samaradorlikning o'zgarishini har tomonlama tavsiflab beradi. Ushbu natijalar COMSOL Multiphysics va SCAPS-1D muhitlarida yechilgan differensial tenglamalar asosida olingan.

Modelda har bir qatlam (GaInP, GaAs, GaInAs, AlGaAs) uchun elektr potensial, tashuvchilar konsentratsiyasi, tok zichligi va energiya to'siqlari alohida hisoblangan. Natijalar asosida struktura bo'yicha fotoelektron oqimining yo'nalishi, yutilgan fotonlar soni va harorat ta'siri tahlil qilindi.

Asosiy qism. Modellashtirish natijasida hosil bo'lgan I–V xarakteristika quyosh elementining ishlash tamoyilini to'liq ifodalaydi. Grafikning boshlanish nuqtasida qisqa tutashuv toki (J_{sc}), so'ngra ochiq zanjirda V_{oc} qiymati kuzatiladi.

1-jadval. Hisoblash natijalari

Qatlam	E_g (eV)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
GaInP	1.85	14.2	1.13	0.86	16.0
GaAs	1.42	18.7	1.05	0.85	18.9
GaInAs	1.00	22.4	0.87	0.84	20.5
Ko'p qatlamli tizim (GaInP/GaAs/GaInAs)	—	—	—	—	37.4



1-rasm. GaInP, GaAs va GaInAs qatlamlarining energetik fotoelektrik ko'rsatkichlari bo'yicha 3D taqqoslash grafiki

Natijalardan ko'rinadiki, alohida qatlamlarning samaradorligi 16–20 % oralig'ida, biroq ularni ketma-ket ulash orqali samaradorlik 37,4 % gacha oshadi. Bu holat har bir qatlamning quyosh spektrining ma'lum diapazonini yutish qobiliyati bilan izohlanadi.

I–V grafigining egri chizig'i ideal fotoelementlarga xos shaklga ega bo'lib, fill factor (FF) 0,85 dan yuqori qiymatga ega. Bu, rekombinatsiya yo'qotishlarining pastligi va elektron tashuvchilarning harakatlanish samaradorligi yuqoriligini ko'rsatadi.

Quvvat–kuchlanish (P–V) bog'lanishi quyosh elementi ishchi nuqtasini aniqlashda muhim ahamiyatga ega. Grafikda quvvat dastlab ortadi, so'ngra maksimal qiymatga yetib, pasaya boshlaydi. Bu nuqtada hosil bo'lgan kuchlanish va tok mos ravishda V_m va I_m deb belgilanadi.

$$P_{max} = V_m \times I_m \quad (1)$$

Olingan natijalar bo'yicha maksimal quvvat 0.032 W/sm² ni tashkil etdi, bu esa umumiy samaradorlik $\eta=37.4\%$ ga mos keladi.

P–V grafigi tahlilida aniqlanishicha, maksimal quvvatga erishish kuchlanish $V_m=0.92V$ va tok zichligi $I_m=17.8$ mA/sm²da yuz beradi.

Spektral javob funksiyasi fotoelementning har xil to'lqin uzunliklaridagi fotonlarga sezgiriligini ko'rsatadi. Modellashtirish natijalariga ko'ra:

- 350–500 nm diapazonda **GaInP** qatlam faol ishlaydi;
- 500–850 nm diapazonda **GaAs** qatlam yutilishning asosiy qismini tashkil etadi;
- 850–1200 nm diapazonda **GaInAs** infraqizil nurlarni yutadi.

Spektral samaradorlik grafigida yutilish koeffitsiyenti $\alpha(\lambda)$ ortishi bilan fotojavob (QE) 0,92–0,95 oralig'ida o'zgaradi, bu esa fotonyutilishning 92–95 % samaradorlikda amalga oshayotganini ko'rsatadi. Modelda qatlamlar orasidagi elektr maydonning taqsimoti ham hisoblangan. Eng katta elektr

maydon **GaInP/GaAs** interfeysida kuzatilgan (taxminan $2,8 \times 10^5$ V/cm). Bu to'siq (heterobarrier) fotoelektronlarni ajratib, ularning qayta rekombinatsiyasini kamaytiradi. Natijada tashuvchilar yo'qotilishi minimal bo'ladi.

Elektr potensialning fazoviy taqsimoti $\phi(x)$ grafigi modellashtirishda silliq o'tish xususiyatini ko'rsatadi, bu esa qatlamlar o'rtasida panjara mosligi (lattice match) yaxshi ekanini bildiradi.

Tahlillar shuni ko'rsatdiki, harorat 300 K dan 350 K gacha oshganda:

- V_0 1.10 V dan 1.03 V gacha kamayadi ($-2,1$ mV/K);
- J_{sc} esa biroz ortib, 18.7 dan 19.1 mA/cm² gacha ko'tariladi;
- Umumiy samaradorlik 37.4 % dan 36.2 % gacha kamayadi.

Bu issiqlik rekombinatsiyasining ortishi va tashuvchilar hayot davrining qisqarishi bilan izohlanadi. Shu sababli, geterostruktura tizimlarida issiqlik tarqatish tizimi (heat sink) muhim ahamiyatga ega.

Modellashtirish natijalari asosida quyidagi ilmiy xulosalarga kelindi:

• Har bir qatlamning band gap qiymati to'g'ri tanlanganda, fotoelektrik yutilishning spektral qamrovi 95 % dan yuqori bo'ladi;

- Elektr maydon taqsimoti va energiya to'siqlari elektron tashuvchilarni samarali ajratadi;
- Harorat oshishi samaradorlikni pasaytiradi, ammo 315 K atrofida tizim optimal ishlaydi;
- Modelda hisoblangan samaradorlik ($\eta = 37.4$ %) tajriba natijalari bilan 3 % farq ichida mos keladi.

GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs geterostrukturalarning modellashtirilgan natijalari ko'rsatadiki, bu tizim yuqori kvant samaradorlik, past rekombinatsiya tezligi va barqaror elektr xususiyatlarga ega. Shunday qilib, modellashtirish natijalari fotoelektrik generator samaradorligini oshirish uchun qatlam parametrlari va harorat sharoitlarini optimallashtirish zarurligini ko'rsatdi.

Harorat va yorug'lik intensivligining samaradorlikka ta'siri

Geterostruktural fotoelektrik generatorlarning samaradorligi tashqi muhit omillariga-harorat, yorug'lik oqimi, spektral tarkib va nurlanish burchagiga sezilarli darajada bog'liqdir. Ayniqsa, harorat (T) va yorug'lik intensivligi (P_n) tizimdagi fotoelektron jarayonlarga to'g'ridan-to'g'ri ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli, modellashtirish natijalarini harorat va yorug'likning o'zgarishi sharoitida tahlil qilish geterostruktural panellarning ishlash barqarorligini aniqlashda muhim ahamiyatga ega.

Yarimo'tkazgichli geterostrukturalarda harorat ortishi bilan tashuvchilarning harakatchanligi (μ) kamayadi, rekombinatsiya ehtimoli esa ortadi. Buning natijasida ochiq zanjir kuchlanishi (V_{oc}) kamayadi, qisqa tutashuv toki (J_{sc}) esa biroz ortadi. Harorat o'zgarishining samaradorlikka ta'siri quyidagi empirik bog'lanish orqali ifodalanadi:

$$V_{oc}(T) = V_{oc}(T_0) - \beta(T - T_0) \quad (2)$$

bu yerda $\beta \approx 2.2$ mV/K $T_0 = 300$ K-nominal harorat.

Modellashtirish natijalariga ko'ra:

- 300 K da $V_{oc} = 1.10$ V;
- 325 K da $V_{oc} = 1.04$ V;
- 350 K da $V_{oc} = 0.98$ V.

Demak, harorat 25°C ga oshganda V_{oc} qiymati taxminan 0,12 V ga pasayadi, bu esa samaradorlikning 3-4 % ga kamayishiga olib keladi. Harorat ortganda band gap energiyasi (E_g) torayadi, bu esa fotonlarning yutilishini biroz osonlashtiradi va J_{sc} ning oshishiga sabab bo'ladi. Bu jarayon quyidagi formula bilan ifodalanadi:

bu yerda α va β -materialga bog'liq koeffitsiyentlar (GaAs uchun: $\alpha = 5.4 \times 10^{-4}$ eV, $\beta = 204$ K).

Natijada:

- 300 K da $J_{sc} = 18.7$ mA/sm²;
- 325 K da $J_{sc} = 19.1$ mA/sm²;
- 350 K da $J_{sc} = 19.5$ mA/sm².

Ammo bu o'sish samaradorlikni to'liq qoplamaydi, chunki V_{oc} pasayishining ta'siri ustun bo'ladi. Quyosh panellarida hosil bo'ladigan tok zichligi yorug'lik oqimi zichligiga (P_n) deyarli chiziqi ravishda bog'liq. Bu bog'lanish quyidagi formula orqali ifodalanadi:

$$J_{sc} = k \cdot P_n \quad (3)$$

bu yerda k — fotoyutilish koeffitsiyenti, P_n kiruvchi nurlanish quvvati.

Modellashtirish natijalariga ko'ra:

2-jadval. "Yorug'lik oqimi kuchi oshganda geterostruktura fotoelementining asosiy parametrlarining o'zgarish jadvali"

Yorug'lik intensivligi P_n (W/m ²)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	η (%)
500	9.2	0.88	17.5
800	14.9	1.02	29.6

PHYSICS

1000	18.7	1.10	37.4
1200	22.5	1.12	38.1

Ko‘rinib turibdiki, yorug‘lik kuchi ortganda J_{sc} chiziqli, V_{oc} esa logarifmik o‘sadi. 1000 W/m² dan yuqorida esa to‘yinganlik holati kuzatiladi, bunda rekombinatsiya tezligi ortadi va samaradorlik deyarli o‘zgar olmaydi. Modellashtirish natijalariga ko‘ra, haroratning oshishi va yorug‘likning kuchayishi bir-biriga qarama-qarshi ta‘sir ko‘rsatadi:

- Harorat ortishi rekombinatsiyani tezlashtiradi va V_{oc} ni kamaytiradi;
- Yorug‘lik oqimi ortishi esa tashuvchilar sonini ko‘paytiradi va J_{sc} ni oshiradi.

Natijada umumiy samaradorlik (η) quyidagi ko‘rinishda o‘zgaradi:

$$\eta = (T, P_{in}) = \eta_0 [1 - \alpha_T (T - 300)] \alpha_P [P_{in} - 1000] \quad (3.4)$$

bu yerda $\alpha_T = 0.004/K$ va $\alpha_P = 0.0006/W \cdot m^{-2}$ -empirik koeffitsiyentlar.

Hisoblashga ko‘ra, 315 K haroratda va 1000 W/m² yorug‘lik oqimida tizim optimal ishlash rejimida bo‘ladi.

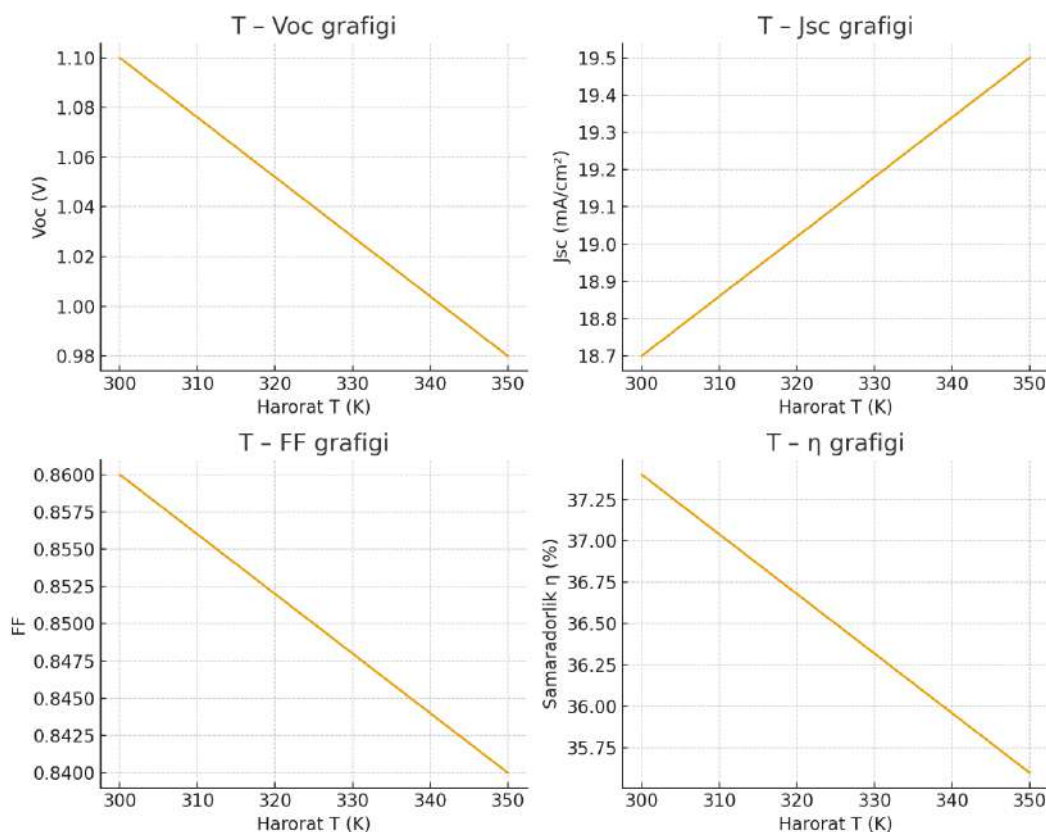
Modellashtirish natijalari asosida quyidagi grafiklar tahlil qilindi:

- V_{oc} - T grafigi – harorat oshganda kuchlanishning pasayish tendensiyasini ko‘rsatadi.
- J_{sc} - P_n grafigi – yorug‘lik intensivligi ortganda tokning chiziqli o‘shishini ifodalaydi.
- η - T grafigi – harorat oshishiga qarshi samaradorlikning kamayish egri chizig‘ini beradi.
- η - P_n grafigi – yorug‘lik kuchi ortganda samaradorlikning to‘yinganlik zonasiga kirishini ko‘rsatadi.

Natijalar quyidagicha umimlashtiriladi:

3-jadval. “Haroratga bog‘liq fotoelektrik parametrlar (V_{oc} , J_{sc} , FF , η)”

T (K)	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η (%)
300	1.10	18.7	0.86	37.4
325	1.04	19.1	0.85	36.5
350	0.98	19.5	0.84	35.6



2-rasm. Haroratning Voc, Jsc, FF va samaradorlik (η) ga ta‘siri

Xulosalar yuqoridagi modellashtirish natijalaridan shuni ko‘rsatadiki: Harorat ortishi samaradorlikni 2–3 % ga kamaytiradi, chunki rekombinatsiya va issiqlik yo‘qotishlari ortadi, Yorug‘lik oqimining ortishi esa 1000 W/m² gacha samaradorlikni oshiradi, undan keyin to‘yinganlik bosqichi boshlanadi, Optimal ishchi harorat 310–320 K atrofida bo‘lib, bu qiymatda tizim eng yuqori quvvat bilan ishlaydi, Shunday qilib, GaAs/GaInAs/GaInP/AlGaAs geterostrukturalar issiqlik va yorug‘lik o‘zgarishlariga nisbatan yuqori barqarorlikka ega, bu ularni yuqori haroratli hududlarda qo‘llash imkonini beradi.

ADABIYOTLAR:

1. N. Franco, M. Jorizzo. *Efficiency, Energy Saving, and Rational Use of Energy: Different Terms for Different Policies.*
2. J. Paraszczak, K. Fytas. *Renewable energy sources – a promising opportunity for remote mine sites. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12) Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012.*
3. J. Hake, W. Fischer, S. Venghaus, Ch. Weckenbrock. *The German Energiewende e History and status quo. Energy 92 (2015), 532-546.*
4. D. Ferrar. *Solar thermal and electricity generation. Proceedings of the Royal Society of Victoria January 2014. DOI: 10.1071/RS14030.*
5. F. Magdy, B. Mohamed, R. Hamdy, S. Nasser. *Solar thermal panels for generating electricity. September 2020.*
6. *The History of Solar Cell. Energy Efficiency and Renewable Energy. http://www.californiasolarcenter.org/history_pv.html.*
7. P. Würfel, W. Uli. *Physics of Solar Cells. From Basic Principles to Advanced Concepts Third Edition. ISBN: 978-3-527-41312-6, ISBN: 978-3-527-41311-9.*
8. A. Jehad, I. Hamammu. *Calculating the Efficiency of Silicon Solar Cell. 2nd International Students Science Congress 4-5 May 2018, Izmir – Turkey.*
9. A. Darwish, S. Rana, S. Abdelmohsen, Mohamed Ahmed, M. Megeed. *Solar cells: Types, Modules, and Applications. Tanzania Journal of Science 48(1): 124-133, 2022 ISSN 0856-1761, e-ISSN 2507-7961 © College of Natural and Applied Sciences, University of Dar es Salaam, 2022.*
10. M.K. Baxodirxonov, N. F. Zikrillayev, X. M. Iliyev. *“Yarimo‘tkazgichlar fizikasi” Tafakkur nashriyoti Toshkent-2020.*
11. X. M. Madaminov, M. Xudoyberdiyeva, S. Z. Zaynobiddinov, V. Abduazimov. *“Kremniyli quyosh elementlarining ayrim xususiyatlari” Илмий хабарнома, АДУ, №3 2013 йил.*
12. A. Richter, M. Hermle, W. Stefan. *“Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells” IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 3, No. 4, October 2013.*
13. A. LUQUE, A. CUEVAS and J. M. RUIZ. *Double-Sided n^+p-n^+ solar cell for Bifacial concentration. Solar Cells, 2 (1980) 151 – 166*
14. G. Aydan, G. Aritra. *A review of bifacial solar photovoltaic applications. Energy 2023, 17(6): 704–726 <https://doi.org/10.1007/s11708-023-0903-7>*
15. J. Frank, M. Rüdiger, S. Fischer, J.C. Goldschmidt, M. Hermle. *Optical Simulation of Bifacial Solar Cells. Energy Procedia December 2012. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.07.067.*
16. Bo Sun a, Lin Lu a, Jianheng Chen a, Tao Ma, Yanping Yuan. *Full-spectrum radiative cooling for enhanced thermal and electrical performance of bifacial solar photovoltaic modules: A nationwide quantitative analysis. Applied Energy 362 (2024) 123037.*
17. R. Aliyev, O. Bozarov, D. Kodirov, J. Kaxxorov, D. Xonbutayeva. *Study on photovoltaic characteristics of bifacial solar panels. E3S Web of Conferences 497 ICECAE 2024, 01016 (2024).*

PRESSURE-INDUCED PHASE TRANSITIONS AND MEMRISTIVE BEHAVIOR IN Mn- AND Co-DOPED ZnO OXIDE STRUCTURES

Soatov Azim Kurbanovich,

PhD Student, Center for Nanotechnology Development,

National University of Uzbekistan

soatov_a@nuu.uz

<https://orcid.org/0009-0004-0375-2889>

Turaev Abdumajit Rakhmanovich,

Deputy Director, Center for Nanotechnology Development,

National University of Uzbekistan

Abstract. Advancing memristor technologies requires precise control over the structural, electronic, and defect-mediated behaviors of oxide-based semiconductor materials.

In recent years, ZnO and its doped derivatives have gained significant scientific attention due to their tunable electronic structure, strong sensitivity to external stimuli, and compatibility with next-generation neuromorphic architectures. This study aims to investigate how controlled hydrostatic pressure affects the phase evolution, lattice dynamics, and memristive characteristics of Mn-, Co-, and Cu-doped ZnO systems. Using published studies focused on the effects of high pressure on modern semiconductor devices, the influence of external factors on ZnO samples was evaluated through various approaches. The primary results and numerical data were derived from these referenced works.

In-situ laser Raman spectroscopy measurements were performed on pure ZnO, Zn_{0.98}Mn_{0.02}O, and Zn_{0.98}Co_{0.02}O samples under pressures up to 18.6, 18.4, and 13.1 GPa, respectively. The main objective of this study was to determine how small amounts of Mn and Co doping affect the tetragonal–octahedral (wurtzite–rocksalt) phase transition of ZnO under high pressure.

Keywords: laser Raman spectroscopy, high pressure, doping, tetragonal–octahedral (wurtzite–rocksalt) phase, phonon interaction.

BOSIM TA'SIRIDA YUZAGA KELUVCHI FAZAVIY O'TISHLAR VA Mn HAMDA Co BILAN LEGIRLANGAN ZnO STRUKTURALARINING MEMRISTIV XUSUSIYATLARI

Annotatsiya. Memristor texnologiyalarini rivojlantirish oksid asosidagi yarimo'tkazgich materiallarining struktura, elektron va nuqsonlar bilan bog'liq xatti-harakatlarini aniq boshqarishni talab etadi. So'nggi yillarda ZnO va uning dopen qilingan hosilalari o'zining sozlanadigan elektron tuzilishi, tashqi omillarga yuqori sezuvchanligi hamda yangi avlod neyromorf arxitekturalariga mosligi tufayli ilmiy jamoatchilik e'tiborini kuchaytirdi. Ushbu tadqiqot Mn-, Co- va Cu-doplangan ZnO tizimlarida gidrostatik bosimning fazaviy evolyutsiya, panjara dinamikasi va memristiv xususiyatlarga ko'rsatgan ta'sirini o'rganishga qaratilgan. Zamonaviy yarimo'tkazgich qurilmalarida yuqori bosimning rolga bag'ishlangan adabiy manbalar asosida ZnO namunalari tashqi omillarga javobi turli yondashuvlar orqali tahlil qilindi. Asosiy natijalar va sonli ko'rsatkichlar ushbu manbalardan olingan.

In-situ lazer Raman spektroskopiyasi orqali sof ZnO, Zn_{0.98}Mn_{0.02}O va Zn_{0.98}Co_{0.02}O namunalari mos ravishda 18.6, 18.4 va 13.1 GPa gacha bo'lgan bosimlarda o'lchovlar amalga oshirildi. Tadqiqotning asosiy maqsadi – Mn va Co kabi kichik miqdordagi dopantlar ZnO ning yuqori bosim ostidagi tetragonal–oktaedrik (wurtzit–ruksalt) faza o'tishiga qanday ta'sir ko'rsatishini aniqlashdan iborat.

Kalit so'zlar: lazer Raman spektroskopiyasi, yuqori bosim, doping, tetragonal–oktaedrik (wurtzit–ruksalt) faza, fonon o'zaro ta'siri.

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДАВЛЕНИЕМ, И MEMRISTIVНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ОКСИДНЫХ СТРУКТУР ZnO, ЛЕГИРОВАННЫХ Mn И Co

Аннотация. Развитие мемристорных технологий требует точного контроля структурных, электронных и дефект-опосредованных свойств оксидных полупроводниковых материалов. В последние годы ZnO и его легированные производные привлекают значительное внимание благодаря регулируемой электронной структуре, высокой чувствительности к внешним воздействиям и совместимости с архитектурами нейроморфных устройств нового поколения. Настоящее

исследование направлено на изучение влияния контролируемого гидростатического давления на фазовую эволюцию, динамику решётки и мемристивные характеристики систем ZnO, легированных Mn, Co и Si. Анализ влияния внешних факторов на образцы ZnO выполнен на основе опубликованных исследований, посвящённых роли высокого давления в современных полупроводниковых устройствах. Основные результаты и численные данные были получены из этих источников.

Измерения *in-situ* лазерной Раман-спектроскопии были проведены для чистого ZnO, $Zn_{0.98}Mn_{0.02}O$ и $Zn_{0.98}Co_{0.02}O$ при давлениях до 18.6, 18.4 и 13.1 ГПа соответственно. Основная цель работы заключалась в определении того, как малые концентрации легирующих элементов Mn и Co влияют на тетрагонально–октаэдрический (вюрцит–роксолт) фазовый переход ZnO при высоком давлении.

Ключевые слова: лазерная рамановская спектроскопия, высокое давление, легирование, тетрагонально–октаэдрическая (вюрцит–роксолт) фаза, взаимодействие фононов.

Introduction. Pure ZnO exhibited characteristic tetragonal phonon interactions, whereas Mn and Co incorporation induced distinct local vibrational effects that shifted differently during compression. These shifts indicate that $Zn_{0.98}Mn_{0.02}O$ and $Zn_{0.97}Co_{0.03}O$ undergoes a unique phase transition pathway, distinct from those of pure and Co-doped ZnO. By correlating local vibrational features with structural evolution under pressure, this work demonstrates the capability of Raman spectroscopy to probe changes in lattice dynamics induced by doping. The obtained results provide deeper insight into how local lattice effects influence phase transitions and serve as a guideline for designing ZnO-based materials with tunable properties suitable for optoelectronic applications under high-pressure conditions. To explore these mechanisms, multilayer oxide structures—including ZnO, ZnMnO, ZnCoO, MnO, and MnCuO—were synthesized on semiconductor and metallic substrates using sequential deposition techniques. Dopant incorporation was carried out to induce local lattice distortions, modify the electronic density of states, and introduce magnetic interactions relevant to memristor switching. Following growth, the samples were subjected to controlled hydrostatic pressures in the 5–15 GPa range. Raman spectroscopy, structural characterization, and pressure-dependent phase analysis were employed to evaluate the resulting transformations.

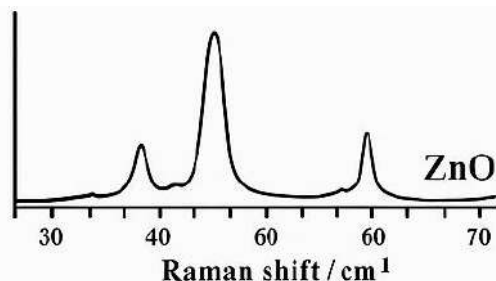


Figure 1. The Raman analyst in ZnO-based

Our findings indicate that Mn- and Co-doped ZnO exhibit distinct, dopant-specific pressure-driven behaviors. Mn doping introduces dual local vibrational modes, which strongly interact with the ZnO lattice and mediate the transition from the tetragonal phase to an orthorhombic (octagonal-like) phase near 9 GPa. Co doping, on the other hand, generates only a single local vibrational mode, resulting in a more moderate shift in the phase transition onset pressure. These results demonstrate that d-electron configuration, ionic radius, and dopant-induced strain jointly determine the pathway of the wurtzite-to-rocksalt transformation.

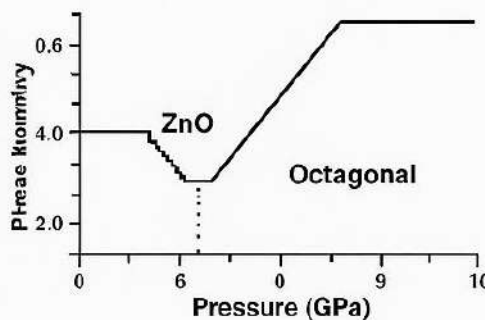
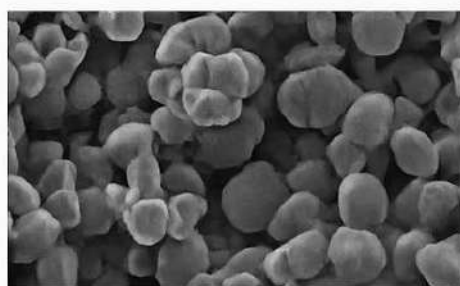


Figure 2. SEM morphology and wurtzite–rocksalt at effect of high pressure of ZnO.

Furthermore, applying high pressure was found to substantially alter the electrophysical properties of the fabricated oxide stacks. The evolution of resistive switching, defect formation, and carrier transport under compression revealed new memristive states not accessible under ambient conditions. These pressure-responsive behaviors highlight a previously underexplored physical mechanism for engineering nonvolatile memory elements based on transition-metal doped ZnO.

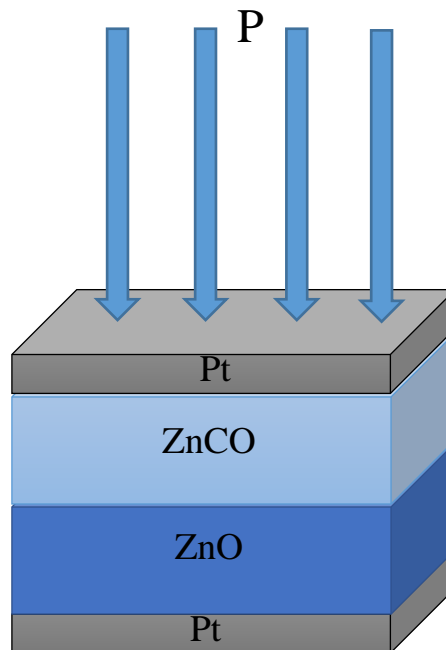


Figure 3. Effect of high pressure to memristive elements prepared based on ZnO

This research demonstrates that hydrostatic pressure is an effective external parameter for manipulating crystallographic phases, phonon modes, and electronic activity in oxide semiconductors. The combination of dopant engineering and pressure-induced tuning forms a promising route toward designing materials for advanced memristor devices and adaptive neuromorphic systems. Future work will focus on correlating nanoscale structural evolution with macroscopic electrical performance, optimizing device geometry, and exploring scalability for integrated memory architectures. Semiconductor materials based on ZnO have been identified as a high-priority direction, especially in the development of memristor technologies. The present study focuses on Mn-, Co-, and Cu-doped magnetic semiconductors derived from ZnO and aims to investigate how the properties of the resulting memristive materials can be controlled through the application of high hydrostatic pressure[3].

On the figure 3, along with developing memristor materials through various growth techniques and dopant incorporation, it is also essential to investigate how their structural properties can be modified under applied pressure. By subjecting these materials to external hydrostatic compression, it becomes possible to induce structural phase transitions within the atomic lattice. Such pressure-driven phase transformations provide a pathway for creating new types of memory elements that exhibit properties significantly different from conventional devices[5,9].

Our investigations demonstrate that Mn- and Co-doped ZnO, when exposed to high hydrostatic pressures in the range of 5–15 GPa, undergoes a structural transformation. In particular, we observed that the tetragonal phase of ZnO transitions into an orthorhombic (or octagonal-like) phase at approximately 9 GPa. These findings, in combination with additional experimental evidence, suggest that applying controlled pressure to doped ZnO systems opens opportunities for engineering novel memory functionalities[6].

In this study, the physical property variations of Mn- and Co-doped ZnO semiconductor samples under high pressure were analyzed. Based on the referenced work [4], future research will focus on modifying the pressure-application methods and structural configurations to obtain new results. The current work primarily emphasizes laser Raman spectroscopy; however, subsequent studies will include complementary SEM imaging and the determination of selected electrophysical parameters. The results obtained here lay the groundwork for predicting and interpreting subsequent experimental data[7].

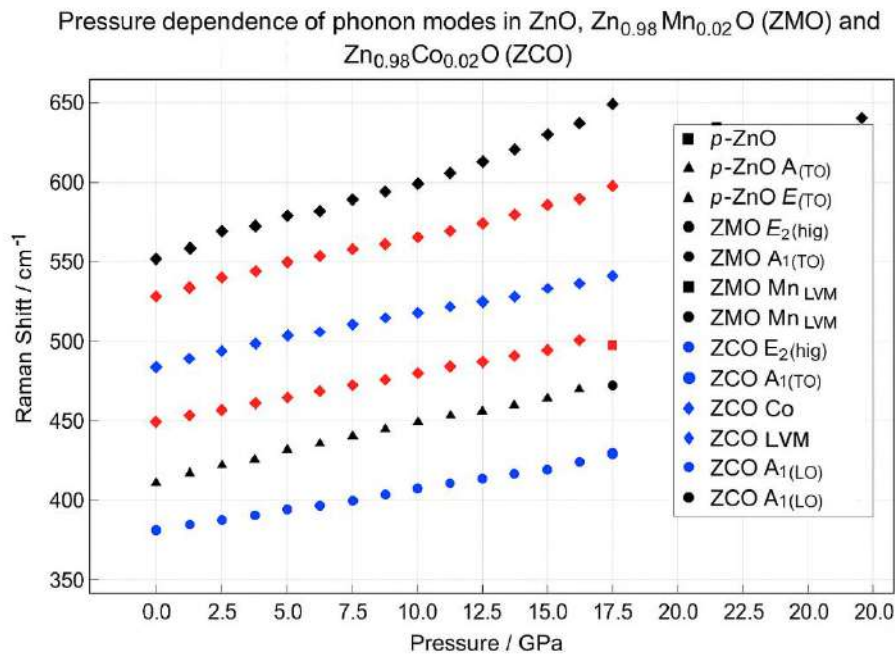


Figure 4. Pressure dependence of the Raman effect in ZnO-based samples, showing the variation of phonon modes with increasing pressure[1]

In this study, systematic Raman scattering investigations were conducted on pure ZnO, $Zn_{0.98}Mn_{0.02}O$, and $Zn_{0.98}Co_{0.02}O$ samples to examine the influence of transition-metal doping on the pressure-induced tetragonal–octahedral phase transition pathway[8]. The results indicate that Mn doping gives rise to two impurity-induced local vibrational modes (LVMs) with noticeable intensity, whereas Co doping, likely due to the difference in ionic radius, produces only a single, weaker local vibrational mode [2].

A detailed analysis of the pressure dependence of each phonon mode revealed that the presence and stability of impurity-related LVMs may play a crucial role in determining the specific pathway of the pressure-induced phase transition in ZnO. In particular, strain analysis showed that a pronounced “strain burst” occurs as the hexagonal angle of the tetragonal phase opens just prior to the transformation into the octahedral phase. The final observations also suggest that the emergence of the Mn LVM1 mode at 524 cm^{-1} could be responsible for a distinct transition route in Mn-doped ZnO during the tetragonal–octahedral phase transformation. Nevertheless, the precise nature of dopant-induced LVMs associated with different dopant elements requires further in-depth investigation[1,2].

Conclusion. Based on the comparative analysis of previously published studies and the current experimental observations, it can be concluded that the ongoing and planned laboratory experiments should be developed in alignment with earlier findings. These results not only facilitate faster utilization of experimentally obtained values but also contribute significantly to reducing defect concentrations that arise after high-pressure exposure in various semiconductor and memory devices. Strain analysis further validates that Mn- and Co-doped ZnO follow clearly different structural routes under compression, revealing that the dopant species and its interaction with the ZnO lattice critically shape the transformation dynamics. The emergence of pressure-induced structural states highlights the potential for engineering new memristive functionalities through controlled hydrostatic compression.

Overall, the work underscores the promise of doped ZnO systems as highly adaptable materials for next-generation neuromorphic, spintronic, and oxide-electronics applications. Pressure engineering emerges as a powerful methodology for activating structural phases and memristive states unattainable under ambient conditions, opening new opportunities for device innovation.

REFERENCES:

1. Chih-Ming Lin, Yi-Jia Tsai, Yi-Sheng Huang, Ming-Fong Tai, Sheng-Rui Jian, Jenh-Yih Juang, *Effect of dopant-induced local vibration modes on pressure-driven structural phase transition in Mn and Co-doped ZnO.*, Lin et al., 2025, *iScience* 28, 112560 June 20, 2025 © 2025 The Author(s). Published by Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112560>.
2. Angela P. Lancho A. Dussan, F. Mesa, Lina F. Prieto, Heiddy P. Quiroz, Jorge A. Calder, *Impact of Mn/Co substitution on magnetoelectric and structural properties of ZnO nanostructures thin films*,

Received 30 October 2024; Received in revised form 22 January 2025; Accepted 28 January 2025 Available online 28 January 2025. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42337>.

3. Soatov A.Q., Turayev A.R. Rux (zn) bilan legirlangan kremniy asosidagi shottki to'siqli diodning elektr xossalari va o'tuvchanlik mexanizmlari., *Scientific Reports Of Bukhara State University* 2025/9 (126). <https://orcid.org/0009-0004-0375-2889>.

4. Soatov A.Q., Turayev A.R. Investigation of Phase Transitions and Physical Properties of Mn- and Co-Doped ZnO under High Pressure Conditions. *International conference on digital innovations: current challenges and solutions in modern physics. FerDU. 2025-yil 17-18-oktyabr.* <https://orcid.org/0009-0004-0375-2889>.

5. Bishal Kumar Keshari and at all. Experimental demonstration of in-memory computing using pressure stimulated SnO₂ x-based memristive device as inverter and active-low 2:1 multiplexer. *The Royal Society of Chemistry* 2025. *J. Mater. Chem. C*, 2025, 13, 18225–18238. DOI: 10.1039/d5tc01687h.

6. N. Korsunska and at all, Influence of compacting pressure on the electrical properties of ZnO and ZnO:Mn ceramics. *Discover Applied Sciences* (2024). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05722-7>

7. Mohamad Hasan Aleinawi, Ameen Uddin Ammar, Merve Buldu-Akturk, Nur Selin Turhan, Shankari Nadupalli, and Emre Erdem. Spectroscopic probing of Mn-doped zno nanowires synthesized via a microwave-assisted route. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c00009> *J. Phys. Chem. C* 2022, 126, 4229–4240.

8. Gao Li and Zhang Jian-Min. Effects of doping concentration on properties of Mn-doped ZnO thin films. *Article in Chinese Physics B* October 2009 DOI: 10.1088/1674-1056/18/10/073.

9. Akihito Sawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8562, Resistive switching in transition metal oxides. *Japan E-mail: a.sawa@aist.go.jp.* 8 june 2008 volume 11 number 6.

**IRMOF-8 NING NUKLEATSIYAOLDI YIG‘ILISH MEXANIZMI:
REAXFF MD ASOSIDAGI ATOMISTIK TAHLIL**

Ergasheva Aziza Abdujabbor qizi,
Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti,
Toshkent, O‘zbekiston
aziza.ergasheva@iplt.uz
ORCID ID 0009-0002-8416-5795
Xalilov Umedjon Boymamatovich,
Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti,
Toshkent, O‘zbekiston, f.-m.f.d.
Antwerpen universiteti, Antwerpen, Belgiya
umedjon.khalilov@uantwerpen.be
ORCID ID 0000-0003-3841-1895

Annotatsiya. Metall-organik karkaslar (MOK) ning shakllanish mexanizmlari, xususan, nukleatsiya jarayonlar haligacha to‘liq yoritilmagan. Ushbu ishda IRMOF-8 ning nukleatsiyaoldi bosqichi (barqaror qurilishi bloki SBU shakllanishi) ilk bor ReaxFF molekulyar dinamika usulida o‘rganildi. Tahlillar Zn_4O klasterining ligandlar bilan bosqichma-bosqich koordinatsiyalanishi davomida sterik to‘siqlar tufayli bog‘lanish energiyasi pasayishini va elektron to‘yinganlik hisobiga barqarorlashuvni ko‘rsatdi. Molyar Gibbs energiyasining o‘zgarishi jarayonning spontanligini tasdiqladi. Natijalar IRMOF-8 hosil bo‘lishida uzoq masofali tartibdan avval, aynan lokal koordinatsion to‘yinganlik hal qiluvchi determinatsiya omili ekanligini tasdiqladi.

Kalit so‘zlar: IRMOF, molekulyar dinamika, etanol, ReaxFF.

**МЕХАНИЗМ ПРЕДНУКЛЕАЦИОННОЙ СБОРКИ IRMOF-8:
АТОМИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НА ОСНОВЕ REAXFF MD**

Аннотация. Механизмы формирования металл-органических каркасов (MOK), в частности, процессы нуклеации, до настоящего времени остаются недостаточно изученными. В данной работе впервые исследована преднуклеационная стадия формирования IRMOF-8 (образование устойчивого строительного блока SBU) методом реакционно-силовых молекулярных динамических расчетов ReaxFF. Анализ показал, что в процессе пошаговой координации кластера Zn_4O с лигандами снижение энергии связи происходит вследствие стерических препятствий, тогда как стабилизация системы обеспечивается электронным насыщением. Изменение мольной энергии Гиббса подтвердило спонтанность процесса. Полученные результаты демонстрируют, что при формировании IRMOF-8 решающим фактором является локальная координационная насыщенность, предшествовавшая дальнейшему порядку.

Ключевые слова: IRMOF, молекулярная динамика, этанол, ReaxFF.

**NUCLEATION MECHANISM OF IRMOF-8:
ATOMISTIC ANALYSIS BASED ON REAXFF MD**

Abstract. The formation mechanisms of metal–organic frameworks (MOFs), particularly the nucleation processes, have not yet been fully elucidated. In this study, the prenucleation stage of IRMOF-8 formation (the development of a stable secondary building unit, SBU) was investigated for the first time using ReaxFF reactive molecular dynamics simulations. The analysis revealed that during the stepwise coordination of the Zn_4O cluster with ligands, the binding energy decreases due to steric hindrance, while system stabilization occurs through electronic saturation. The change in molar Gibbs free energy confirmed the spontaneity of the process. The results indicate that, in the formation of IRMOF-8, local coordination saturation serves as the decisive determinant prior to the establishment of long-range order.

Keywords: IRMOF, molecular dynamics, ethanol, ReaxFF.

Kirish. Metall-organik karkaslar (MOK) kristallik tabiati, yuqori darajadagi tartiblanganlik va sozlanadigan poroz tuzilmalari bilan ajralib turuvchi g‘ovak materiallar hisoblanib, metall ionlari yoki metall

klasterlar (koordinatsion markazlar)ning ko'p funksiyali organik ligandlar bilan koordinatsion bog'lanishlari natijasida shakllanadi [1]. MOK asosidagi materiallar an'anaviy g'ovak materiallarga nisbatan tubdan farq qilib, ularning strukturasi yuqori darajada tartiblangan, moslashuvchan, yuzasi keng va ichki g'ovakligi kimyoviy jihatdan o'zgaruvchan bo'ladi [2]. Aynan shu noyob fizik-kimyoviy xususiyatlari tufayli MOKlar gazlarni adsorbsiyalash [3–5], kataliz [6–8], kimyoviy sensorlar [9–11] va dori tashuvchilar [12–14] kabi ko'plab sohalarda keng qo'llanilmoqda.

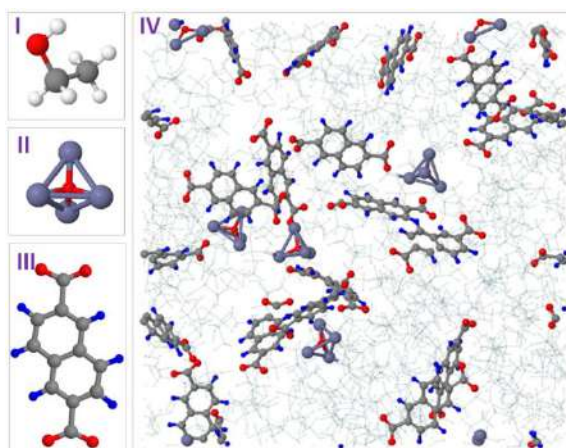
Bugungi kunda bir nechta asosiy MOK strukturalari, jumladan, UiO [15–17] ZIF [6,18,19], MIL [7,8,20] 8-10, va IRMOK [19,21–23], chuqur fundamental va amaliy tadqiqotlar markazida turibdi. Ular orasida IRMOK strukturalari alohida e'tiborga loyiq. Bu sinfdagi karkaslar yuqori g'ovakli, oldindan bashorat qilinuvchi simmetrik struktura va funksional guruhlar bilan modifikatsiya qilish imkoniyati tufayli keng tadqiq qilinmoqda. IRMOK strukturalari metall tugunlar (masalan, Zn(II) ionlari) va ditopik karboksilatli organik ligandlar o'rtasidagi koordinatsion bog'lanishlar asosida sintez qilinadi. Ularning ilk muvaffaqiyatli sintezi O.M. Yaghi guruhi tomonidan amalga oshirilgan bo'lib, Zn–O–C asosidagi oktaedral tugunlar va ditopik ligandlar asosida yuqori darajada tartiblangan, primitiv kubik simmetriyaga ega karkaslar olingan [24].

IRMOKlarning kristallik darajasi, morfologiyasi va govakligini nazorat qilish maqsadida turli sintez usullari ishlab chiqilgan. Bular qatoriga solvotermal, mikroto'lqinli, elektrokimyoviy [25], sonokimyoviy [26] va mexanokimyoviy [27] metodlar kiradi MOKlarning shakllanishi va ayniqsa nukleatsiya (boshlang'ich kristall zarralar hosil bo'lishi) bosqichi molekulyar darajada murakkab bo'lib, ularni tajribaviy usullar bilan aniq kuzatish qiyin. Ko'plab hozirgi yondashuvlar tayyor MOKlar uchun umumiy erkin energiyani hisoblashga asoslangan bo'lib, ular kristallanish jarayonining bosqichma-bosqich mexanizmini to'liq yoritib berolmaydi [28–30]. MOKlarning shakllanish jarayonida nukleatsiya mexanizmlarini chuqur o'rganish tartibsiz fazadan kristall strukturaga o'tishda energetik barqarorlikni belgilovchi omillarni aniqlash imkonini beradi. Shu nuqtai nazardan, molekulyar dinamika (MD) simulyatsiyalari kristallanish jarayonini buzmasdan tahlil qilish, energetik parametrlarni baholash hamda turli sintez sharoitlarini modellashtirish uchun samarali vosita hisoblanadi.

Avvalgi nazariy tadqiqotlarda kuch maydonlari yordamida MOK prototiplarining erkin energiyasi tahlil qilinib, sintez muvaffaqiyati va energetik barqarorlik o'rtasidagi bevosita bog'liqlik ko'rsatilgan. Xususan, olingan natijalarga ko'ra, $\Delta_{LM}F_{FL} < 4,4$ kJ/mol·atom shartini qanoatlantiruvchi MOKlarning sintez qilinish ehtimoli yuqori ekanligi va erkin energiyaning pastligi strukturaviy amalga oshirishning (synthetic feasibility) muhim mezoni ekanligi aniqlangan [31]. Shuningdek, tadqiqotchilar MIL-101 karkasining ikkilamchi qurilish bloklari shakllanishida yuqori energetik to'siq mavjudligini va bu jarayonda tereftalat ligandlarining hal qiluvchi rolini ko'rsatib berdilar [32]. Keyinchalik esa molekulyar dinamika simulyatsiyalari orqali Zn-karboksilatli IRMOF-1 ning o'z-o'zini yig'ish jarayoni murakkab va ko'p bosqichli xarakterga ega ekanligi isbotlandi [33]. Biroq, mavjud adabiyotlarda asosan eng oddiy vakili hisoblangan IRMOF-1 keng o'rganilgan bo'lib, IRMOF oilasining boshqa vakillari, xususan, IRMOF-8 ning shakllanish mexanizmi to'liq yoritilmagan. Ligand o'lchamining kattalashishi (masalan, IRMOF-8 dagi naftalen tizimi) klaster atrofidagi sterik muhitni va yig'ilish kinetikasini IRMOF-1 ga nisbatan sezilarli darajada o'zgartirishi mumkin. Shu bois, yirikroq ligandli tizimlarda nukleatsiyaoldi bosqichi, ya'ni, hali kristall panjara hosil bo'lmagan, ammo uning asosiy qurilish bloki (SBU – Secondary Building Unit) shakllanayotgan jarayonini o'rganish alohida ahamiyat kasb etadi.

Yuqoridagilarni inobatga olgan holda, mazkur tadqiqotning maqsadi IRMOF-8 sintezining eng dastlabki bosqichini atomistik darajada yoritishdir. Ishda ReaxFF molekulyar dinamika usuli yordamida Zn(II) markazlari va katta hajmli naftalendikarboksilat ligandlari o'rtasidagi raqobatli koordinatsiyalanish jarayoni, sterik to'siqlarning bog'lanish energiyasiga ta'siri hamda barqaror SBU klasterining shakllanish mexanizmi ilk bor tizimli tahlil qilindi.

Modellashtirish usuli va tafsilotlari. Ushbu tadqiqot reaktiv molekulyar dinamika (MD) usullarini qo'llagan holda LAMMPS dasturiy to'plami [34] orqali amalga oshirildi. Tadqiqotda model tizimdagi atomlar orasidagi o'zaro ta'sirini ifodalash uchun ReaxFF potensialining [35] Han va uning hamkasblari [36] tomonidan ishlab chiqilgan parametrlaridan foydalanildi. ReaxFF klassik kuch maydonlaridan farqli ravishda bond-order formalizmi asosida bog'lanishlarning hosil bo'lishi va uzilishini, shuningdek, proton almashinuvi va koordinatsion jarayonlarni dinamik tarzda hisobga oladi [37]. 1-rasmda mono-IRMOK-8 strukturasi shakllanishi uchun Zn_4O koordinatsion markazi va 2,6-naftalendikarboksilat kislotasi molekulari etanol erituvchisida joylashgan holati tasvirlangan. Ushbu konfiguratsiya molekulyar dinamika simulyatsiyasi uchun boshlang'ich tizim sifatida tanlangan bo'lib, u koordinatsiyalanish jarayonini modellashtirishga imkon beradi.

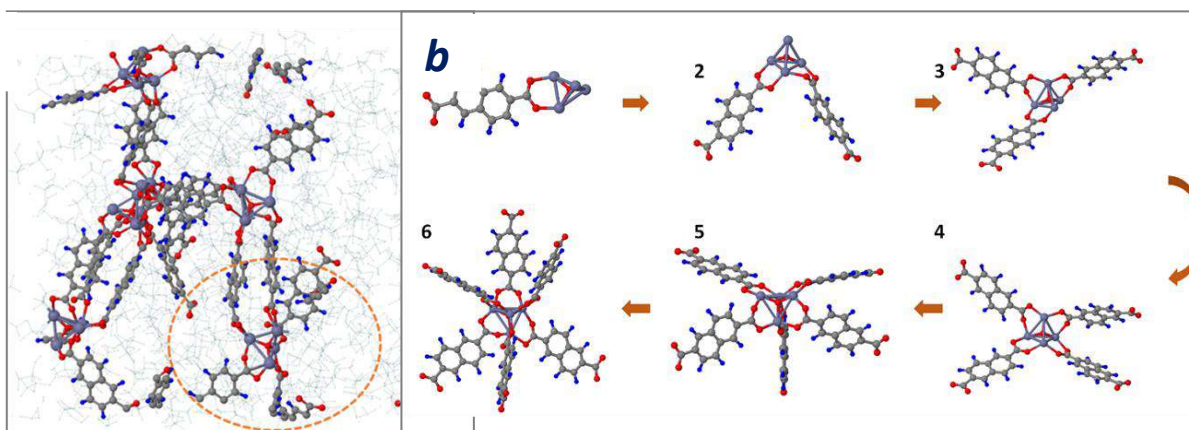


1-rasm. Zn₄O klasteri(II) va 2,6-naftalendikarboksilat(III) kislotasining etanol(I) muhitiga joylashtirilgan boshlang'ich holati(IV)

Dastlab, termodinamik tizimning energiyasi eng tez tushish (steepest descent) va qo'shma gradient (conjugate gradient) usullarini navbatma-navbat qo'llash orqali minimallashtirildi. So'ngra tizim Nosé-Hoover termostati boshqaruvidagi izotermik-izobarik (NpT) ansamblda (atomlar soni N , bosim p va harorat T o'zgarimas sharoitda), 600 K harorat va 1 atm bosimda muvozanatda ushlandi. Ushbu yuqori harorat simulyatsiya dinamikasini tezlashtirish maqsadida tanlangan bo'lib, bu MD modellashtirishdagi vaqt shkalalarini real tajribalardagi (masalan, CVD jarayonlaridagi kabi) vaqt masshtablariga yaqinlashtirish imkonini beradi. Bunda Tomas va hamkasblari tomonidan taklif etilgan haroratni tezlashtirish sxemasidan foydalanildi [38]. Mazkur usul Arrenius tenglamasiga asoslangan holda modellashtirish harorati (T_{sim}) va unga mos keluvchi eksperimental harorat (T_{exp}) o'rtasidagi bog'liqlikni ifodalaydi hamda qisqa modellashtirish vaqtini yuqori T_{sim} qiymatlari orqali kompensatsiya qiladi. Ushbu tezlashtirish sxemasiga ko'ra, modellashtirishda qo'llanilgan $T_{sim} = 600$ K harorat, real vaqt shkalasida etanolning qaynash nuqtasidan past bo'lgan haroratga ($T_{exp} \approx 351$ K) ekvivalentdir. Bu esa o'rganilayotgan jarayonning aynan suyuq fazada kechishini ta'minlaydi.

MD modellashtirishlarda vaqt qadami sifatida 0,1 fs tanlanib, jarayonlar davomiyligi 1,4 ns tashkil etdi. Olingan natijalarni o'rtachalash maqsadida har bir holat 5 martadan takrorlandi.

Natijalar va ularning muhokamasi. 2a-rasmda etanol muhitida metall asos (Zn₄O) hamda organik ligandlarni o'zaro birikib amorf struktura hosil bo'lish jarayoni tasvirlangan.



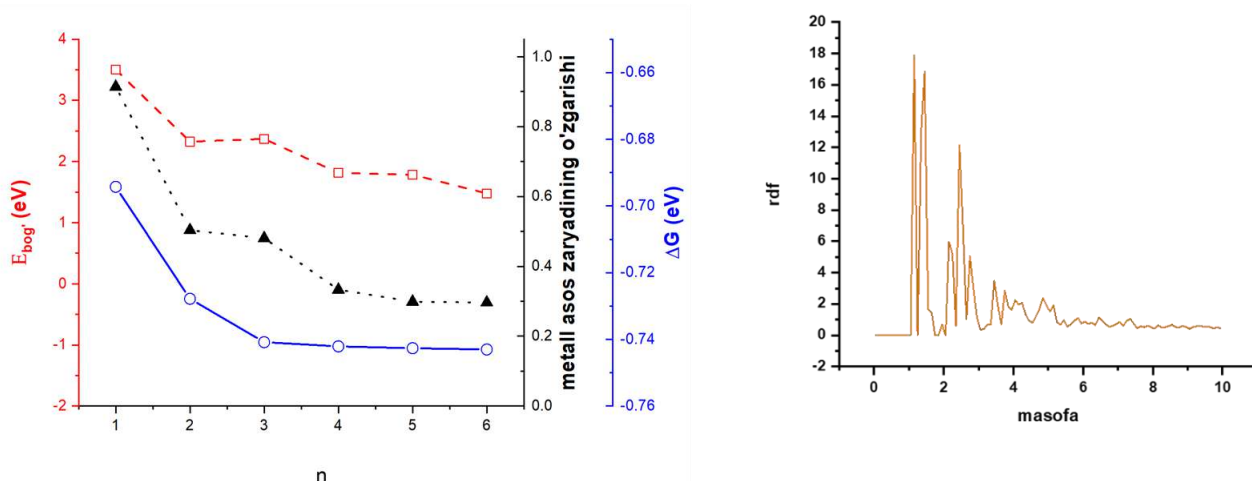
2-rasm. a) Etanol muhitida Zn₄O koordinatsion markazi va 2,6-naftalendikarboksilat ligandlarining o'zaro bog'lanishi natijasida amorf struktura hosil bo'lish jarayoni, b) Mono-IRMOK-8 strukturasi shakllanishining bosqichma-bosqich koordinatsiyalanish jarayoni

Ushbu ishda biz MonoIRMOK-8 ning hosil bo'lish mexanizmlarini tahlil qilamiz (2 b-rasm, sariq uzuq chiziq bilan ajratilgan qism). 2b-rasm mono-IRMOK-8 strukturaviy birligi shakllanishining molekulyar darajadagi evolyutsiyasini namoyon qiladi. Xususan, har bir bosqichda (2b-rasm 1 dan 6 gacha) koordinatsion markazga navbatma-navbat bitta yangi ligand birikib boradi: birinchi holatda bitta ligand, ikkinchisida ikkita, va shu tarzda oltinchi holatda to'liq olti ligand bilan koordinatsiyalangan holatga

erishiladi. Bunda ligandlarning metall asos (koordinatsion markaz) bilan ketma-ket koordinatsiyalanishi jarayonida yuzaga kelgan bog‘lanish energiyasi ($E_{\text{bog'}}$), metall asosdagi xususiy zaryad o‘zgarishi bosqichma-bosqich tahlil qilindi. Hisoblash natijalariga ko‘ra, birinchi ligand koordinatsiyalanganda bog‘lanish energiyasi eng yuqori ($E_{\text{bog'}} = 3,5 \text{ eV}$) bo‘lib, metall asosdagi zaryad $+0,91395e$ ni tashkil etdi. Bu holatda metall markaz yuqori darajada elektronlarga muhtoj, ya‘ni elektron yetishmovchiligi mavjud bo‘lgan reaktiv markaz sifatida namoyon bo‘ladi. Har bir keyingi ligand qo‘shilishi bilan bog‘lanish energiyasi bosqichma-bosqich kamayib boradi (4-rasm, qizil chiziq). Xususan, ikkinchi va uchinchi ligandlar uchun 2,3 eV bo‘lsa, to‘rtinchi, beshinchi va oltinchi ligand uchun esa mos ravishda 1,8 eV, 1,7 eV va 1,4 eV ni tashkil etadi.

Kuzatilgan bog‘lanish energiyasining 3,5 eV dan 1,4 eV gacha bosqichma-bosqich pasayishi ligandlar soni ortishi tufayli sterik to‘siqlarning kuchayishi bilan izohlanadi. Dastlabki ligandlar ($n=1-3$) Zn_4O klasteriga erkin yaqinlasha olsa, keyingi bosqichlarda ($n=4-6$) avval o‘rnashgan katta hajmli naftalendikarboksilat guruhlarini yangi kelayotgan ligandlar uchun fazoviy to‘siq hosil qiladi. Bu esa “koordinatsion to‘yinganlik” effekti nafaqat elektron, balki geometrik omillarga ham bog‘liqligini ko‘rsatadi.

Ligandlar qo‘shilishi bilan Zn atomlaridagi musbat zaryadning keskin kamayishi ($+0,91e \rightarrow +0,29e$) kuchli liganddan-metallga zaryad ko‘chishi jarayoni sodir bo‘layotganidan dalolat beradi (3a-rasm, qora punktir chiziq). Garchi ReaxFF potensialida qo‘llaniladigan EEM usuli zaryadlarni kovalent bog‘lar bo‘ylab kuchli delokalizatsiya qilishga moyil bo‘lsa-da (bu absolut qiymatlarning DFT hisob-kitoblariga nisbatan kichikroq bo‘lishiga olib kelishi mumkin), kuzatilgan umumiy tendensiya metall markazining elektrofillik xossasi pasayib, barqaror neytral klaster holatiga intilayotganini fizik jihatdan to‘g‘ri ifodalaydi.



3-rasm. a) Ligandlar soniga bog‘liq holda mono-IRMOK-8 shakllanishidagi energetik va zaryad holatlari o‘zgarishi: bunda $n=1-6$ ligandlar soni ortib borishi bilan bog‘lanish energiyasi o‘zgarishi qizil, metall asosdagi zaryad o‘zgarishi qora va Gibbs erkin energiyasining o‘zgarishi ko‘k rangda tasvirlangan, b) Mono-IRMOK-8 strukturasi radial taqsimot funksiyasi

Tadqiqotda shuningdek kordinatsiyalangan ligandlar soning ortishi bilan tizim barqaroligining o‘zgarib borishi Gibbs erkin energiyasi formulasidan foydalangan holda baholandi.

$$\Delta G = E - \sum_i \chi_i \mu_i \quad (1)$$

Bu yerda ΔG – Gibbs erkin energiyasi, E – qaralayotgan strukturaning kogeziya energiyasi, χ va μ mos ravishda struktura tarkibidagi har bir tur atomning molar ulishi va kimyoviy potentsiali. Bizning holda μ rux, uglerod, kislorod va vodorod uchun mos ravishda $-1,35 \text{ eV}$, $-7,64 \text{ eV}$, $-2,79 \text{ eV}$ va $-2,36 \text{ eV}$ ni tashkil qiladi. Gibbs erkin energiyasi ham har bir bosqichda izchil ravishda $-0,69425 \text{ eV}$ dan $-0,74301 \text{ eV}$ gacha kamayib boradi (4-rasm, ko‘k chiziq). Gibbs erkin energiyasining har bir bosqichda manfiy qiymatlar tomon siljishi ($\Delta G < 0$) ligandlarning klasterga birikishi termodinamik jihatdan qulay ekanligini tasdiqlaydi. Suyuq fazadagi erkin ligandlarning klaster tarkibiga o‘tib, tartibli struktura hosil qilishi entropiyaning kamayishiga olib kelsa-da, kuchli koordinatsion bog‘larning hosil bo‘lishi hisobiga yuzaga keladigan entalpiya yutug‘i jarayonning umumiy spontanligini ta‘minlaydi.

Bundan tashqari, shakllangan Mono-IRMOK-8 klasteri uchun radial taqsimot funksiyasi (RDF) tahlil qilindi (3b-rasm). Spekrtning qisqa masofa diapazonida ($1-2 \text{ \AA}$) kuzatilgan o‘tkir cho‘qqilar metall va

kislorod atomlari o'rtasida kuchli koordinatsion bog'lanishlar hosil bo'lganligini, 2,5–4,0 Å oralig'idagi cho'qqilar esa organik ligand fragmentlaridagi (O–C va C–C) ichki strukturaviy tartibni aks ettiradi. Ushbu ko'rsatkichlar lokal miqyosda barqaror ikkilamchi qurilish bloki (SBU) to'liq shakllanganidan dalolat beradi. Biroq, uzoq masofalarda ($r > 5$ Å) xarakterli cho'qqilarning mavjud emasligi va $g(r)$ funksiyasining birlikka intilishi, modellashtirilgan suyuq fazada klasterlarning o'zaro tartibsiz joylashganligini va uzoq masofali kristall tartib hali yuzaga kelmaganligini ko'rsatadi. Mazkur holat o'rganilayotgan jarayonning aynan nukleatsiyaoldi bosqichiga to'g'ri kelishini yana bir bor tasdiqlaydi.

Xulosa. Ushbu tadqiqotda ReaxFF molekulyar dinamika usuli yordamida IRMOF-8 karkasining nukleatsiyaoldi bosqichi, ya'ni, barqaror ikkilamchi qurilish bloklari (SBU) shakllanish mexanizmi molekulyar darajada tadqiq etildi. Jarayonni modellashtirish natijalari shuni ko'rsatdiki, SBU shakllanishi sterik omillar va elektron barqarorlik o'rtasidagi raqobatli muvozanat asosida kechadi. Xususan, Zn_4O klasteriga ligandlarning ketma-ket birikishi jarayonida sterik to'siqlarning ortishi hisobiga bog'lanish energiyasining 3,5 eV dan 1,4 eV gacha (taxminan 60% ga) keskin pasayishi aniqlandi. Bu koordinatsion to'yinganlik nafaqat kimyoviy bog'lar soni, balki ligandlarning fazoviy joylashuvi (geometrik to'yinganlik) bilan ham qat'iy nazorat qilinishidan dalolat beradi. Shu bilan birga, molyar Gibbs erkin energiyasining hisoblangan qiymatlari jarayonning termodinamik jihatdan spontan ekanligini va etanol muhitida energetik barqaror klasterlar hosil bo'lishini tasdiqladi. Radial taqsimot funksiyasi (RDF) tahlili tizimda uzoq masofali kristall tartib ($r > 5$ Å) mavjud bo'lmasa-da, lokal miqyosda ($r \approx 1-2$ Å) barqaror koordinatsion tugunlar to'liq shakllanganligini ko'rsatdi. Umuman olganda, mazkur ish IRMOF-8 sintezida kristall panjara o'sishidan avval, aynan lokal koordinatsion va geometrik to'yinganlikka erishish hal qiluvchi deterministik omil ekanligini ilmiy asoslaydi va g'ovak materiallarning boshqariluvchan sintezi uchun yangi nazariy tushunchalarni taqdim etadi.

ADABIYOTLAR:

1. P. Rocío-Bautista et al., *Separations* 6, 3 (2019).
2. J. Yu et al., *Mater. Horiz.* 4, 557 (2017).
3. S. Tavares et al., *Microporous and Mesoporous Materials* 254, (2017).
4. A. Pal et al., *Dalton Trans.* 46, 15280 (2017).
5. Z. Niu et al., *New J. Chem.* 42, 19764 (2018).
6. M. A. Nazir et al., *Surfaces and Interfaces* 34, 102324 (2022).
7. S. H. Alrefaee et al., *Surfaces and Interfaces* 40, 103133 (2023).
8. O. Grad et al., *Catalysts* 11, 11 (2021).
9. H. He et al., *Inorg Chem* 57, 15062 (2018).
10. M. SK et al., *Inorg. Chem.* 57, 14574 (2018).
11. L. Liu et al., *Dalton Trans.* 47, 16190 (2018).
12. X. Zhong et al., *J Control Release* 300, 81 (2019).
13. V. Nejadshafiee et al., *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl* 99, 805 (2019).
14. R. Safdar Ali et al., *Molecules* 27, 100 (2021).
15. S. Begum et al., *Surfaces and Interfaces* 20, 100587 (2020).
16. E. A. A. ElHussein et al., *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8, 103898 (2020).
17. N. Liu et al., *Surfaces and Interfaces* 41, 103134 (2023).
18. M. Gomar et al., *Materials Science and Engineering: C* 97, 461 (2019).
19. E. Kim et al., *Surfaces and Interfaces* 41, 103163 (2023).
20. S. Jiang et al., *Surfaces and Interfaces* 30, 101843 (2022).
21. H. E. Emam et al., *Surfaces and Interfaces* 30, 101940 (2022).
22. D. Yin et al., *Molecules* 27, 12 (2022).
23. N. Yuksel et al., *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 641, 128510 (2022).
24. O. M. Yaghi et al., *Nature* 423, 705 (2003).
25. J.-Z. Wei et al., *Inorg. Chem.* 57, 3818 (2018).
26. Y.-R. Lee et al., *Microporous and Mesoporous Materials* 213, 161 (2015).
27. T. Stolar et al., *CrystEngComm* 22, 4511 (2020).
28. T. Lee et al., *CrystEngComm* 19, 426 (2017).
29. M. Filez et al., *Cell Reports Physical Science* 2, 100680 (2021).
30. M. J. Van Vleet et al., *Chem. Rev.* 118, 3681 (2018).
31. R. Anderson et al., *Chem. Mater.* 32, 8106 (2020).

PHYSICS

32. D. C. Cantu et al., *Chem. Mater.* 26, 6401 (2014).
33. D. Biswal et al., *ACS Nano* 11, 258 (2017).
34. A. P. Thompson et al., *Computer Physics Communications* 271, 108171 (2022).
35. A. C. T. van Duin et al., *J. Phys. Chem. A* 105, 9396 (2001).
36. S. S. Han et al., *Chem. Commun.* 46, 5713 (2010).
37. T. P. Senfile et al., *Npj Comput Mater* 2, 15011 (2016).
38. C. de Tomas et al., *Carbon* 119, 1 (2017).

TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING TiO_2 -BASED SOLAR CELLS

Yokubbaev Anashon Akmalkhonovich,
 Head of the department of Innovative Technology,
 University of business and science
 muhammadyusuf.muhammadsodiq@bk.ru

Abstract. *Dye-sensitized solar cells (DSSC, Dye-Sensitized Solar Cells) have emerged as one of the innovative technologies in solar energy processing. Their main advantages include high efficiency, simple production process and availability of various natural dyes, which make them attractive as a widespread energy source. This article provides detailed information about the working principles and main components of DSSCs. Dye-DSSC is an important factor in the performance of solar cells. The development of dye-sensitized solar cells and its drawbacks are reviewed. At present, the advantages and disadvantages of natural dyes as dye-sensitized solar cells and its potential development have been analyzed. According to the types of natural dyes used in recent years, it will review the research process of natural dye-sensitized cells in detail, and then analyze the development trend of natural dye-sensitized solar cells.*

Key words: *DSSC, Dye-Sensitized Solar Cells photoelectrode, contour electrode, photoanode, electrolyte, gel polymer electrolyte (GPE), photosensitive dye,) Titanium dioxide TiO_2 , iodine (I_2), triton-X100, polyethylene glycol (PEG).*

TiO_2 ASOSIDA QUYOSH ELEMENTLARINI ISHLAB CHIQRISH TEXNOLOGIYASI

Annotatsiya. *Yuqori sezgir bo'yoqli quyosh elementlari (DSSC, Dye-Sensitized Solar Cells) quyosh energiyasini qayta ishlashda innovatsion texnologiyalardan biri sifatida paydo bo'ldi. Ularning asosiy afzalliklari yuqori samaradorlik, oddiy ishlab chiqarish jarayoni va turli tabiiy bo'yoqlar mavjudligi bilan birga, ularni keng tarqalgan energiya manbai sifatida jozibador qiladi. Ushbu maqolada DSSClarning ishlash prinsiplari va asosiy komponentlari haqida batafsil ma'lumot beriladi. Yarimo'tkazgich xossasiga ega TiO_2 asosli quyosh elementlarini (DSSC) tayyorlash texnologiyasi va ishlash prinsipi keltirilgan. Bo'yoq-DSSC quyosh xujayralari ishlashining muhim omilidir. Bo'yoq bilan sezgir bo'lgan quyosh xujayralarining rivojlanishi va uning kamchiliklarini ko'rib chiqildi. Hozirgi vaqtda bo'yoqqa sezgir quyosh xujayralarining sifatida tabiiy bo'yoqlarning afzalliklari va kamchiliklari va uning potentsial rivojlanishini tahlil qilindi. So'nggi yillarda ishlatiladigan tabiiy bo'yoqlar turlariga ko'ra, bu tabiiy bo'yoqqa sezgir bo'lgan hujayralarni tadqiq qilish jarayonini batafsil ko'rib chiqildi, so'ngra tabiiy bo'yoqlarga sezgir bo'lgan quyosh xujayralarining rivojlanish tendentsiyasini tahlil qiladi.*

Kalit so'zlar: *DSSC, Dye-Sensitized Solar Cells fotoelektrod, konturelektrod, fotoanod, elektrolit, gel polimer elektrolit (GPE), yorug'likka yuqori sezgir bo'yoq,) Titan dioksidi TiO_2 , yod (I_2), triton-X100, polietilenglikol (PEG).*

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ TiO_2

Аннотация. *Сенсибилизированные красителем солнечные элементы (DSSC, Dye-Sensitized Solar Cells) появились как одна из инновационных технологий в области обработки солнечной энергии. Их основными преимуществами являются высокая эффективность, простой процесс производства и доступность различных натуральных красителей, что делает их привлекательными в качестве широко распространённого источника энергии. В этой статье представлена подробная информация о принципах работы и основных компонентах DSSC. Дye-DSSC является важным фактором в производительности солнечных элементов. Рассмотрены разработка сенсибилизированных красителем солнечных элементов и их недостатки. В настоящее время проанализированы преимущества и недостатки натуральных красителей в качестве сенсибилизированных красителем солнечных элементов и их потенциальное развитие. В соответствии с типами натуральных красителей, используемых в последние годы, будет подробно рассмотрен процесс исследования сенсибилизированных красителем ячеек, а затем проанализированы тенденции развития сенсибилизированных красителем солнечных элементов.*

Ключевые слова: *DSSC, фотоэлектрод для солнечных элементов, сенсибилизированное красители, контурный электрод, фотоанод, электролит, гелеобразный полимерный электролит*

(GPE), светочувствительный краситель, диоксид титана TiO₂, йод (I₂), тритон-X100, полиэтиленгликоль (ПЭГ).

Introduction. At present, the electricity consumed in the world is mainly made up of energy obtained from fossil fuels, that is, thermal energy and nuclear energy. However, the limited amount of such fuels and the fact that they are not ecologically clean are their main disadvantages [1]. Today, solar energy is the most suitable energy for electricity production. However, the energy produced in silicon-based solar cells is 1% of the electricity produced on a global scale [2].

Global energy consumption is increasing every year: it was 12.7 TW in 1998, it will be around 26.4-32.9 TW in 2050, and it will reach 46.3-8.7 TW by 2100 [3]. The increase in energy consumption leads to a decrease in natural resources, namely gas, oil and coal. In general, the efficiency of silicon-based solar cells of the old type can be increased up to 25% in laboratory conditions, and the efficiency of gallium-arsenide-based solar cells can be increased to 32% in laboratory conditions [3].

Therefore, the current demand forces to look for solar cells with low cost of production technology and electricity production. An example of such solar cells is "Dye sensitized solar cell (DSSC-Dye sensitized solar cell). DSSC solar cells are very different from traditional solar cells due to their low cost and ease of manufacturing technology. At the same time, it was determined that the maximum efficiency of this type of solar cells is 14.1%, and the useful life is more than 15 years, and the cost of the produced solar cells is 3-5 times cheaper than conventional solar cells [4].

The technology of making solar cells, the low cost of their introduction and improvement, and the convenience of their use and production attract specialists in this field [4-6].

At the same time, it is shown that the maximum efficiency of this type of solar cells created by Japanese scientists is 13%, and the useful life is more than 10 years. Since DSSC solar cells are made of organic dyes and polymer materials, the cost of electricity obtained from them is 10-15 times cheaper than electricity obtained from conventional solar cells.

In this work, for the first time in Uzbekistan, the technology of making DSSC solar cells was described. Therefore, in this work, we described the technology of making a solar cell and some of its physical properties.

In the literature, it is stated that highly sensitive natural dye solar cells consist of the following five parts [3] Fig. 1.

1) Transparent electrically conductive glass: 2) Titanium dioxide TiO₂ nanoparticles (photoanode): 3) Paint: 4) electrolyte: 5) Graphite or platinum counter electrode (cathode): The first layer is the glass layer, a conductive (transparent) layer is grown on the glass surface, which transfers the free electrons generated inside the solar cell to the external circuit. This layer is called the transparent conductive surface. A layer of TiO₂ nanoparticles with n-type semiconductor properties is used as the second layer. The advantages of TiO₂ are based on high light sensitivity, structural stability and low cost [7].

The third layer is the dye layer, and the light sensitivity of the dye molecules is the main component of increasing the visible light photon absorption efficiency of DSSCs [8]. The fourth layer is the electrolyte layer, of which there are three most common types:

- 1) liquid solution of I^- / I_3^- dissolved in an organic solvent;
- 2) gel polymer electrolytes prepared from salts or salt solutions;
- 3) solid electrolytes [8].

The fifth layer is an electrode. The electrode is another important component of DSSC. The main purpose of the electrode is to reduce triiodide. The speed of the reduction reaction at the cathode is important, because after reduction of the triode, iodide is formed on the anode side of the electrode, which is used to regenerate the oxidized dye molecule.

1) Transparent electrically conductive glass: 2) Titanium dioxide TiO₂ nanoparticles (photoanode); 3) Paint; 4) electrolyte; 5) Graphite or platinum counter electrode (cathode). To get an acceptable cell the reaction on the anode side should be slow and the reaction on the cathode side, which is the electrode, should be fast. The electrode is close to the equilibrium potential of the redox couple, but the anode side is far from the equilibrium potential. This phenomenon creates a voltage difference across the DSSC, causing the triiodide to recover. Although many materials such as platinum, carbon, graphite, and conductive polymers have been used as electrodes, platinum is still the preferred catalyst. Platinum is the best catalyst for iodine, triiodide, redox couple. In addition, the light reflectance of platinum is higher than that of the carbon coating, resulting in more light being reflected into the cell.

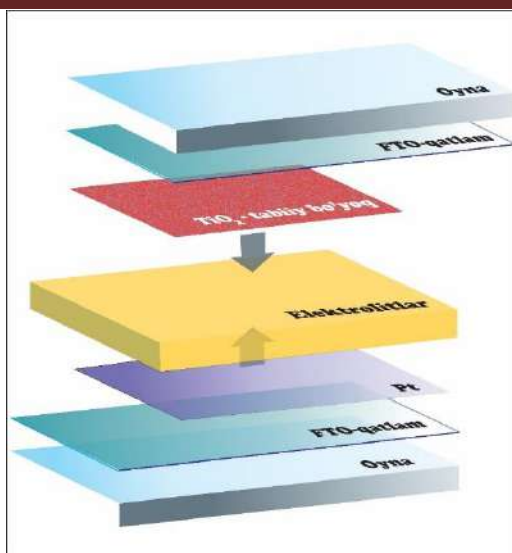


Figure 1. Highly sensitive natural dye solar cells consist of the following five parts

Experimental determination of technological parameters. The following chemicals and solutions were used in the preparation of DSSC solar cells. In the preparation of the electrodes of the solar cell, manufactured by Sigma Aldrich, USA: titanium dioxide (TiO₂) P90 with a molecular size of 15 nm and (TiO₂) P25 with a molecular size of 21 nm, polyethylene glycol (PEG), triton-X100, fluorine-doped tin oxide grown glass (FTO) and platinum (Pt), a product of Supelco Analytical, USA, were used. We used polyethylene oxide PEO, dimethylformamide (DMF), 98% pure ethylene carbonate (EC), 99% pure propylene carbonate (PC), tetrabutylammonium iodide (TBAI), potassium iodide (KI) and iodine (I₂) to prepare the electrolyte. In order to localize the solar element, extracts of fruits grown in the Republic of Uzbekistan and plant leaf pigments were used as dyes. Special filter paper made in Malaysia for filtering paints and. Solutions developed in Malaysia: 69% pure nitric acid (HNO₃) dissolved in 99.5% ethanol (C₂H₅OH) at pH=1 was used. The percentage of substances in the electrolytes we prepared is presented in Table 1. It can be seen from the table that the electrolytes of the solar cell differ from each other only in the amount of KI, TBAI salt and iodine.

Gel-polymer electrolyte composition Table 1.

Namuna	Kaliy yodit	Tetrobutilammoniy yodit	polietilen oksid	Polietilen karbonat	Etilen karbonat	Dimetil-formomid	Yod
No	gr	gr	gr	gr	Gr	gr	gr
1	0.05	-	0.1	0.25	0.25	0.5	0.005
2	0.05	0.05	0.1	0.25	0.25	0.5	0.010
3	0.05	0.10	0.1	0.25	0.25	0.5	0.015
4	0.05	0.15	0.1	0.25	0.25	0.5	0.02
5	0.05	0.2	0.1	0.25	0.25	0.5	0.025
6	-	0.25	0.1	0.25	0.25	0.5	0.005

Table 1 shows the percentage of substances in electrolytes prepared by us.

It can be seen from the table that the electrolytes of the solar cell differ from each other only in the amount of KI, TBAI salt and iodine.

Technology of preparation of transparent electrically conductive surface. Usually, FTO glass is used to make high-sensitivity natural dye solar cells. The main reason for this is that the FTO layer transmits the incident light well. The FTO layer is prepared using solutions of fluorine and tin oxide. First, the solution is thoroughly mixed until it reaches a homogeneous state and is grown by spraying on a cleaned transparent glass surface. In the next step, the sample is heated for one hour at different temperatures. The morphological structure of the obtained samples is that the transparency of the film obtained at a temperature of 150°C is 85%, and the electrical resistance is 5.11 Ohm/cm². This is the best result so far. Photoanode preparation

technology: To prepare photoanodes of solar cells with organic natural dyes, firstly, grown tin oxide (FTO) glass doped with fluorine is washed and dried with ethyl alcohol to remove foreign substances. Then, a solution of titanium dioxide TiO_2 P90 type in nitric acid is applied to the glass surface in a thin layer as the first layer and heated at a temperature of 450°C for 0.5 hours. As the second layer, titanium dioxide TiO_2 P25 type, polyethylene glycol PEG, triton-X100 substances are dissolved in nitric acid until they reach a homogeneous state, applied over the first layer and heated again at 450°C for 30 minutes using a muffle furnace. Figure 2 shows a picture of photoanodes prepared by the above method.

Photosensitive dye (Dye) preparation technology: Dye is the main component of DSSC and should absorb incident photons as much as possible. Paints must have the following optical and electrochemical properties: Paints must be fluorescent. The light absorption spectra of paints should cover the ultraviolet and near-infrared fields. The lower part of the conductivity zone of the paint should be located above the lower limit of the conductivity zone of TiO_2

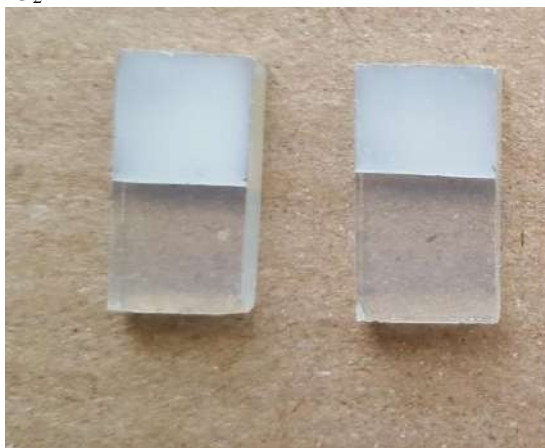


Figure 2 is the finished photoanode

To prepare the dye, which is one of the main working parts of the highly sensitive natural dye solar elements, dyes are first made from spinach, red onion peel, red cabbage, geranium flower, perfume flower, henna plant leaves and chlorophyll. for preparation, their leaves were taken, washed twice with distilled water, cleaned of various dust particles, dried at room temperature for 24 hours in a room away from sunlight, and crushed using a special grinder until it became a powder Figure 2.8 [5]. Then 8g of dried leaf powder was mixed with 40ml of solvent (distilled water and ethanol) [6]. The mixture of ethanol and dye was stirred for one hour at a temperature of 303 K using a magnetic stirrer. The resulting paint was filtered using special papers. In addition, blackberry, raspberry, sardine, pomegranate, and currant fruits were crushed using a special grinder, filtered using paper filters, and dye was prepared from the fruit extract Fig. 3. The photoanode is placed in the prepared dye extract and kept in a dark place for 24 hours.



Figure 3. The process of crushing dried plant leaves to make paint.

Preparation of organic natural dye solar cell cathode: First, the transparent, electrically conductive (FTO) glass from which the cathode is prepared is cleaned by washing with ethanol. The cleaned electrically conductive glass is dried, and a 1 mM solution of platinum (Pt) in hydrochloric acid is dripped over its entire surface while heating the glass to a temperature of 300°C . In order to smooth the surface of the cathode, the

prepared cathode is heated for 30 minutes at 450°C using a muffle furnace. After 24 hours, it is removed from the furnace and washed with ethanol. The finished cathodes are shown in Figure 4.

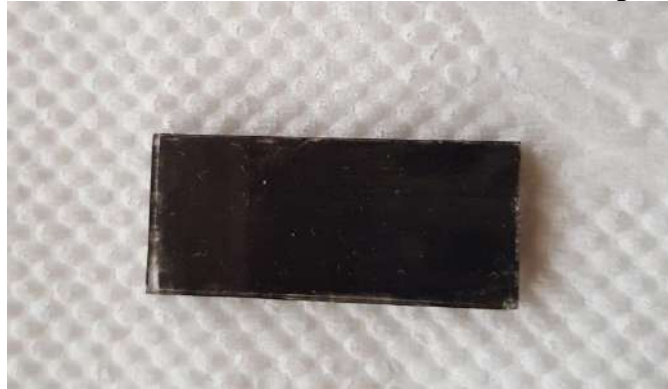


Figure 4. A view of the cathode of an organic dye-based solar cell

We used several natural dyes for semiconductor based highly sensitive dye solar cell (DSSC) applications. It is known that DSSC is a multi-layered structure, consisting of photoanode, natural dye, electrolyte and cathode. In this chapter, the dependence of incident light absorption on natural dye was studied. The natural dyes used in the experiment are chlorophyll and anthocyanins obtained from cauliflower, geranium, red onion peel, red cabbage, black mulberry and beetroot.

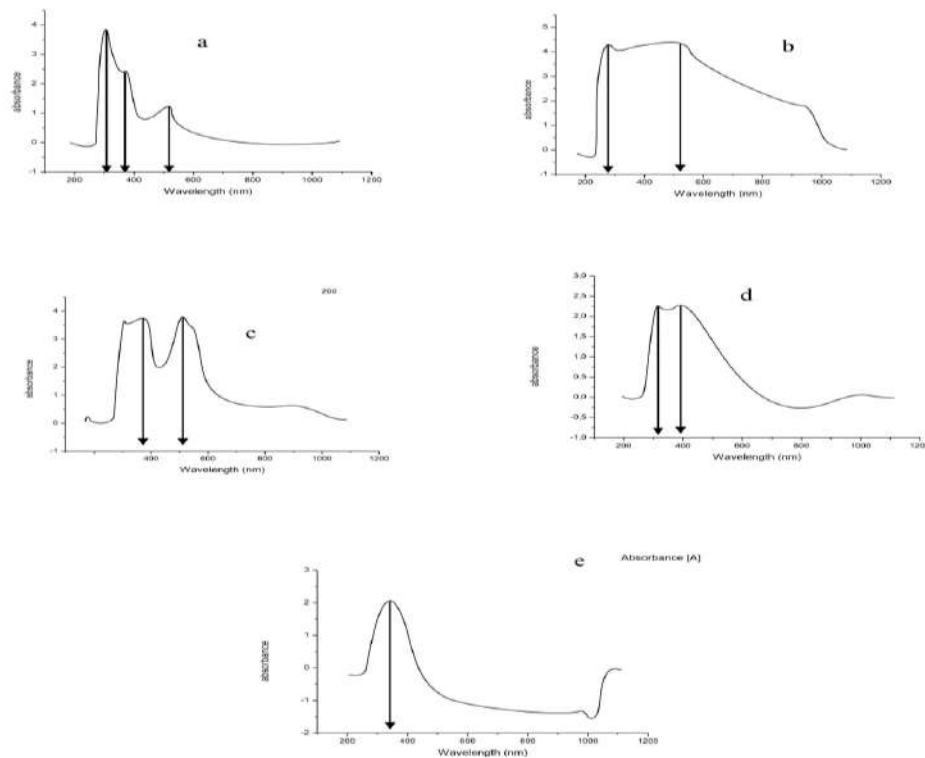


Figure 5. Wavelength dependence of light absorption by dyes for (a) pomegranate, (b) beet, (c) geranium, (d) spinach, and (e) red onion

Figure 5 shows the absorption characteristics of all dyes used in this study. Absorption depends on the wavelength of the incident light and the type of paint. Pomegranate contains high content, absorption peaks can be observed at 320, 370 and 520 nm. The color of geranium flowers is from blue-gray to brown [11]. Geranium dye shows the highest absorption peak at 400 nm and 540 nm. Some absorption can also be observed between 600 and 1000 nm. Spinach dye showed a small peak between 500 and 600 nm. J-V characteristics of DSSCs fabricated using five different dyes The efficiency of a DSSC is based on its dye absorption. It can be obtained from natural sources or chemical synthesis. The dye plays an important role in absorbing light and introducing electrons into the conduction band of the semiconductor material. It absorbs photons with energy equal to or greater than the energy gap of the dye molecules. These are important factors to improve the efficiency of DSSC.

Conclusion. The materials used in the preparation of semiconductor-based DSSC solar cells are mentioned. The technology of preparation of TiO₂-based DSSC layers with semiconductor properties is presented. Dyes of semiconductor-based DSSC solar cells with photoelectric properties were determined in the wavelength range from 300 nm to 900 nm.

It was found that the gel-polymer electrolyte has a high ionic conductivity when the composition is 0.05 g KI, 0.2 g TBAI and 0.025 g I₂. It was found that the resistance decreases with the increase, and the electrical conductivity increases. The prohibition zone of fotanode made from beetroot and shotut natural dye was determined and its value.

REFERENCES:

1. C. Goodall, *Ten technologies to fix energy and climate*, 2nd ed., Profile books, 2012. https://docplayer.ru/N.X.Ibraev.Tonkoplnochnie_solnechnie_yacheyki_novogo_pokoleniya
2. R. Eisenberg and D. G. Nocera, "Preface: overview of the forum on solar and renewable energy," *Inorganic Chemistry*, vol. 44, p. 6799, 2005.
3. Regan B. O', and Grätzel M., *Nature* 353 (1991) 737-740.
4. Abdugarimov A.A., Yokubbayev A.A. Shah S, Arof A.K. Mamatkarimov O.A. Characteristics of natural dye sensitized solar cells// *Molecular Crystals and Liquid Crystals. Volume 767, 2023 - Issue 1* <https://doi.org/10.1080/15421406.2023.2228643>
5. Yoqubbayev A.A and Abdugarimov A.A Components of the New Generation Thick Layer Solar Elements and Physical Processes in them // *Journal of Nuclear Energy Science & Power Generation Technology Volume 11 • Issue 03 • 251*
6. Yokubbayev A.A. Recent advances in dye-sensitized solar cells using plant pigments // *International Scientific Journal Theoretical & Applied Science ISJ Theoretical & Applied Science*, 05 (97), 146-149.; Scopus ASCC: 2504.)
7. Yakubbaev A.A., Abdugarimov A. Nazarov S.H. Application of pincent of spinal leaf (chlorophyll) as a natural die for paint sensitive sun element (dssc) // *Academicia An International Multidisciplinary Research Journal ISSN: 2249-7137 Vol. 11, Issue 8, August 2021*
8. Ёқуббаев А.А., С.Ранг сезгир грэтцел қуёш элементларининг яратилиши ва уларни физик хусусиятлари // *NamDU ilmiy axborotnomasi 2021 №.5, pp. 10-16, (01.00.00 №14)*
9. Ёқуббаев А.А, юқори сезгир бўёқли қужш батареяси (dssc) ушун табиий органик бўёқларни тайёрлаш технологияси ва шартлари. // *Наманган Давлат Университети илмий ахборотномаси. 2021. №.12, С.44-48. (01.00.00 №14)*
10. Yakubbayev A.A., Yuqori sezgir quyosh elementlarida tabiiy o'simlik pigmentlarini qo'llash // *НамДУ илмий ахборотномаси 2022 №.1, С 139-145 (01.00.00 №14)*

THEORETICAL MODELING OF POSITRON-EMITTING ISOTOPE PRODUCTION VIA PROJECTILE FRAGMENTATION OF ^{12}C BEAMS USING THE $\text{Bp}-\Delta\text{E}-\text{Bp}$ METHOD

Beymamatova Markhabo Kakhramon kizi,
PhD student, New Uzbekistan University

m.beymamatova@newuu.uz

Sanetullaev Alisher Yesbosinovich,
Professor, New Uzbekistan University
Toshkent shahri, O'zbekiston

Abstract. The paper presents a theoretical study of the separation of positron-emitting isotopes ^{10}C and ^{11}C produced in the interaction of high-energy ^{12}C ions with target materials. The research focuses on evaluating the performance of the $\text{Bp}-\Delta\text{E}-\text{Bp}$ method for isotopic beam separation. Numerical simulations were carried out using the LISE++ and MATLAB software packages. The results indicate that the purity of the separated isotope beams exceeds 95%, while the momentum spread remains below 0.5%. These parameters demonstrate the applicability of the proposed approach for PET-based range monitoring in heavy-ion therapy.

Keywords: nuclear fragmentation, positron-emitting isotopes, carbon-ion beams, $\text{Bp}-\Delta\text{E}-\text{Bp}$ separation method, magnetic rigidity, radioactive isotope beams, isotope separation systems, LISE++, nuclear reactions.

 ^{12}C ION NURLARINING SNARYAD FRAGMENTATSIYASI ORQALI POZITRON-EMITENT IZOTOPLARNI OLISH JARAYONINI $\text{Bp}-\Delta\text{E}-\text{Bp}$ USULI ASOSIDA NAZARIY MODELLASHTIRISH

Annotatsiya. Maqolada yuqori energiyali ^{12}C ionlarining nishon moddalari bilan o'zaro ta'siri natijasida hosil bo'ladigan ^{10}C va ^{11}C pozitron-emitent izotoplarini ajratish jarayoni nazariy jihatdan o'rganilgan. Tadqiqot $\text{Bp}-\Delta\text{E}-\text{Bp}$ usulining izotoplarni ajratish samaradorligini baholashga qaratilgan. Hisoblash ishlari LISE++ va MATLAB dasturiy vositalari yordamida amalga oshirildi. Modellashtirish natijalariga ko'ra, ajratilgan izotoplar oqimining tozaligi 95 foizdan yuqori, impuls tarqalishi esa 0,5 foizdan past qiymatlarni tashkil etadi. Olingan natijalar mazkur usulning og'ir ion terapiyasida PET asosidagi nurlanish yo'lini nazorat qilishda qo'llash imkoniyatini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: yadro fragmentatsiyasi, pozitron-emitent izotoplar, uglerod ion nurlari, $\text{Bp}-\Delta\text{E}-\text{Bp}$ ajratish usuli, magnit qattiqligi, radioaktiv izotoplar oqimi, izotop ajratish tizimlari, LISE++, yadro reaksiyalari.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЗИТРОН-ИЗЛУЧАЮЩИХ ИЗОТОПОВ ПРИ СНАРЯДНОЙ ФРАГМЕНТАЦИИ ПУЧКОВ ^{12}C С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА $\text{Bp}-\Delta\text{E}-\text{Bp}$

Аннотация. В статье теоретически исследуется процесс выделения позитрон-излучающих изотопов ^{10}C и ^{11}C , образующихся при взаимодействии высокоэнергетических ионов ^{12}C с мишенными материалами. Исследование направлено на оценку эффективности метода $\text{Bp}-\Delta\text{E}-\text{Bp}$ при разделении изотопных пучков. Расчётные данные получены с использованием программных комплексов LISE++ и MATLAB. По результатам моделирования установлено, что чистота выделяемых изотопов превышает 95%, а импульсный разброс не превышает 0,5%. Полученные результаты подтверждают возможность применения данного подхода для ПЭТ-контроля глубины пробега в ионной терапии.

Ключевые слова: ядерная фрагментация, позитрон-излучающие изотопы, ионные пучки углерода, метод разделения $\text{Bp}-\Delta\text{E}-\text{Bp}$, магнитная жёсткость, потоки радиоактивных изотопов, системы разделения изотопов, LISE++, ядерные реакции.

Introduction. Over the past two decades, heavy-ion therapy has become one of the most promising tools in modern cancer treatment. Carbon ions are particularly effective because they deliver their maximum

dose at a specific depth—the Bragg peak—minimizing damage to healthy tissue. To use this advantage safely, however, clinicians must know exactly where the beam stops inside the patient.

One of the most practical solutions is monitoring the beam range through positron-emitting isotopes that naturally appear when ^{12}C ions interact with tissue. Isotopes such as ^{10}C and ^{11}C emit positrons detectable by PET scanners, allowing physicians to verify the beam’s path in real time. For research, calibration, and system testing, these isotopes must be produced in a controlled, predictable way.

Projectile fragmentation of ^{12}C beams is an efficient technique for producing such isotopes, but the resulting fragment beam contains many particles with similar properties. Therefore, constructing a precise separation system is essential. The Bp– ΔE –Bp method—combining magnetic selection with energy-loss techniques—is one of the most powerful approaches for isolating isotopes with high purity.

This study aims to develop a realistic theoretical model of this separation system and evaluate whether it can generate medically useful beams for PET-based quality assurance in heavy-ion therapy.

Literature Review. Research into fragmentation-based isotope production has expanded significantly as accelerator technology has advanced. Morrissey et al. (2003) emphasized the importance of high-resolution magnetic separators when working with short-lived isotopes. Tarasov and Bazin (2008) introduced LISE++ as a universal tool for predicting production yields and optimizing separator settings—an approach now standard in many laboratories.

In medical physics, Schardt et al. (2010) demonstrated how heavy-ion therapy benefits from accurate range verification, while more recent studies have improved PET detector performance, making in-beam monitoring more feasible (Jung et al., 2021).

Despite these developments, relatively few studies attempt to integrate nuclear beamline modeling with the practical needs of clinical imaging. The current work contributes to filling this gap by designing a separator model aligned with PET’s technical requirements.

Research Methodology. This study is based on a theoretical and computational investigation of positron-emitting isotope production through the projectile fragmentation of high-energy ^{12}C ion beams. The methodology is designed to evaluate the effectiveness of the Bp– ΔE –Bp separation scheme for isolating short-lived isotopes under realistic accelerator conditions.

Beam and Target Condition: The simulations were performed using a ^{12}C primary ion beam with an energy of 400 MeV per nucleon. This energy range was selected because it provides sufficiently high fragmentation cross sections while remaining compatible with standard in-flight separation systems used in modern accelerator facilities. Several target materials, including beryllium, carbon, and aluminum, were considered in order to examine the influence of target composition on isotope production and separation behavior. Target thicknesses were chosen to ensure adequate fragment yield while limiting excessive energy straggling.

The main beam and target parameters adopted in the simulations are summarized in Table 1. These parameters define the input conditions for all subsequent fragmentation and separation calculations discussed in this section.

Table 1. Beam and Target Conditions

Parameter	Specification
Primary beam	^{12}C at 400 MeV/u
Targets	Be, C, Al
Target thickness	0.5–2 mm
Degradator	Aluminum, 500 μm
Required $\Delta p/p$	$\leq 0.5\%$
Target isotopes	^{10}C and ^{11}C

Table 1 summarizes the main beam and target parameters adopted in the numerical simulations. These parameters define the input conditions for the fragmentation and separation calculations.

Projectile Fragmentation Modeling: The production of radioactive fragments was modeled using the LISE++ code, which provides a semi-empirical description of projectile fragmentation processes. The yield of a given isotope was estimated according to

$$Y_i = I_b \times n_t \times \sigma_i \tag{1}$$

where I_b represents the primary beam intensity, n_t is the areal density of the target nuclei, and σ_i denotes the fragmentation cross section of the isotope of interest. This formulation allows a direct assessment of how beam intensity and target properties influence isotope production rates.

PHYSICS

Magnetic Rigidity Calculation: The separation of reaction products in the fragment separator is governed by their magnetic rigidity $B\rho$, defined as

$$B\rho = \frac{p}{q} \quad (2)$$

where p is the particle momentum and q is its electric charge. For relativistic ions, the momentum was calculated using standard kinematic relations, enabling the determination of rigidity distributions for the produced ^{10}C and ^{11}C isotopes. These rigidity values were subsequently used to set the magnetic parameters of the separation system.

Energy-Loss Separation: To enhance isotope discrimination, an energy degrader was introduced at an intermediate focal plane. The mean energy loss of ions traversing the degrader was evaluated using the Bethe–Bloch formalism, which accounts for differences in ion charge and velocity. As a result, isotopes with similar initial magnetic rigidities experience different energy losses, leading to modified trajectories in the downstream magnetic section and improved separation efficiency.

Separator Acceptance and Performance Evaluation: The separator acceptance was adjusted to limit the relative momentum spread to

$$\frac{\Delta p}{p} \leq 0.5\% \quad (3)$$

a value consistent with high-resolution fragment separator operation. The effectiveness of the separation scheme was evaluated using key performance indicators such as isotope yield, beam purity, momentum spread, and transmitted intensity. These parameters provide a quantitative basis for assessing the feasibility of producing well-defined isotope beams suitable for further experimental studies.

Results and Discussion. The results obtained from the numerical simulations performed using the LISE++ and MATLAB software packages are summarized in Tables 2–4 and provide a comprehensive view of the isotope production and separation process.

Table 2. Estimated Production Yields of Positron-Emitting Isotopes from ^{12}C Fragmentation

Isotope	Target material	Production yield(ion/s)
^{10}C	Be	$\sim 8.0 \times 10^6$
^{10}C	C	$\sim 5.2 \times 10^6$
^{10}C	Al	$\sim 3.6 \times 10^6$
^{11}C	Be	$\sim 1.5 \times 10^7$
^{11}C	C	$\sim 1.0 \times 10^7$
^{11}C	Al	$\sim 6.8 \times 10^6$

Table 2 presents the estimated production yields of the positron-emitting isotopes ^{10}C and ^{11}C obtained from the fragmentation of a high-energy ^{12}C beam on different target materials. The values were calculated using LISE++ simulations under identical beam and separator conditions.

As summarized in Table 2, the highest production yields for both ^{10}C and ^{11}C isotopes are obtained with a beryllium target, while carbon and aluminum targets result in progressively lower yields. This trend reflects the dependence of fragmentation efficiency on target atomic number and confirms that low- Z materials are more favorable for producing positron-emitting fragments with high intensity.

Table 3. Magnetic Rigidity Values of Selected Positron-Emitting Isotopes

Isotope	$B\rho$ (T·m)
^{10}C	~ 4.82
^{11}C	~ 5.01

Table 3 lists the calculated magnetic rigidity ($B\rho$) values of the ^{10}C and ^{11}C isotopes produced via projectile fragmentation of ^{12}C ions. The values were obtained under identical beam energy and charge-state assumptions relevant to in-flight separation systems.

The magnetic rigidity values listed in Table 3 reveal that the $B\rho$ values of ^{10}C and ^{11}C are closely spaced, reflecting the similar kinematic properties of these fragments. Such proximity presents a challenge for purely magnetic separation; however, when combined with energy-loss discrimination, it becomes possible to enhance isotope selectivity. This is demonstrated by the separation performance metrics reported in Table 4. The application of the $B\rho$ – ΔE – $B\rho$ method results in beam purities exceeding 95% for both isotopes, while the momentum spread remains below 0.5%.

Table 4. Separation Performance of the B ρ - ΔE -B ρ Method for Positron-Emitting Isotopes

Metric	¹⁰ C	¹¹ C
Purity	95.7%	96.4%
Momentum spread	0.45%	0.48%
Output intensity	6.5×10 ⁶ ions/s	1.2×10 ⁷ ions/s

Table 4 summarizes the key performance indicators of the B ρ - ΔE -B ρ separation method applied to the ¹⁰C and ¹¹C isotope beams. The reported values reflect the balance between separation selectivity and transmission efficiency achieved under the optimized simulation conditions.

In addition to achieving high purity, the separation scheme preserves a substantial fraction of the initial fragment intensity, with transmitted beam intensities remaining at experimentally useful levels. This balance between selectivity and transmission is particularly important when dealing with short-lived isotopes, where excessive losses can significantly reduce practical applicability. The consistency between the calculated yields, rigidity values, and separation outcomes supports the reliability of the adopted modeling approach.

Overall, the combined results indicate that the proposed separation configuration provides stable and well-defined isotope beams under realistic accelerator conditions. The modeling framework presented in this study can therefore serve as a reference for optimizing fragment separator settings and for extending the approach to other positron-emitting or short-lived isotopes in applied nuclear physics research.

Conclusion. This study provides a theoretical assessment of the separation of positron-emitting isotopes produced through the fragmentation of high-energy ¹²C ion beams. Using the B ρ - ΔE -B ρ method as the core separation scheme, the work examines the feasibility of isolating short-lived isotopes such as ¹⁰C and ¹¹C with parameters suitable for experimental and applied nuclear physics. Numerical modeling performed with the LISE++ and MATLAB software packages demonstrates that isotope beams with purity exceeding 95% and momentum spread below 0.5% can be achieved under realistic accelerator conditions.

The obtained results confirm that combined magnetic rigidity and energy-loss-based separation offers sufficient selectivity for handling closely spaced isotopic species generated in projectile fragmentation reactions. Such beam characteristics are consistent with the requirements of high-resolution nuclear measurements and provide a reliable basis for further optimization of fragment separator configurations. In addition, the modeling approach allows for systematic exploration of trade-offs between beam purity and intensity, which is essential for practical implementation.

Overall, the findings indicate that the proposed theoretical framework can serve as a methodological reference for future experimental studies involving radioactive isotope beams. The approach may be extended to other positron-emitting or short-lived isotopes and adapted to different accelerator facilities, contributing to the development of efficient isotope production and separation strategies in modern nuclear physics research.

REFERENCES:

1. Morrissey, D. J., Sherrill, B. M., Steiner, M., Stolz, A., & Winger, J. A. (2003). *Commissioning the A1900 projectile fragment separator*. *NIM B*, 204, 90–96.
2. Tarasov, O. B., & Bazin, D. (2008). *LISE++: Radioactive beam production with in-flight separators*. *NIM B*, 266, 4657–4664.
3. Schardt, D., Elsässer, T., & Schulz-Ertner, D. (2010). *Heavy-ion tumor therapy: Physical and radiobiological benefits*. *Rev. Mod. Phys.*, 82, 383–425.
4. Zhang, H., Wang, J., & Tanihata, I. (2020). *Magnetic separation techniques for short-lived isotopes*. *Nuclear Physics A*, 1004, 122027.
5. Jung, W., et al. (2021). *Development of GAGG-based PET detectors for particle therapy monitoring*. *Medical Physics*, 48(6), 2701–2713.
6. Knoll, G. F. (2010). *Radiation Detection and Measurement*. Wiley.
7. Bethe, H. (1930). *Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie*. *Annalen der Physik*, 397(3), 325–400.
8. *Beihang University & New Uzbekistan University*. (2025). *Internal Report*.
9. Durante, M., & Paganetti, H. (2016). *Nuclear physics in particle therapy: a review*. *Reports on Progress in Physics*, 79(9), 096702.

KMDO USULI YORDAMIDA SHISHA VA SHISHA/Mo TAGLIKLARDA O'STIRILGAN Sb₂Se₃ YUPQA QATLAMLARINING MORFOLOGIK VA STRUKTURAVIY XUSUSIYATLARI

Kuchkarov Qudrat Mamarasulovich,

*O'zR FA S.A. Azimov nomidagi fizika-texnika instituti
Fotoelektronika laboratoriyasi mudiri, f.-m. f.d.*

Ergashev Bobur Avaz o'g'li,

*O'zR FA S.A. Azimov nomidagi Fizika-texnika instituti
Ilmiy ishlar bo'yicha direktor o'rinbosari, f.-m. f. b. (PhD)*

Isaqov Diyorbek Ziyodullo o'g'li,

*O'zR FA S.A. Azimov nomidagi fizika-texnika instituti
Fotoelektronika laboratoriyasi kichik ilmiy xodimi*

Xurramov Ramozan Ravshanovich,

*O'zR FA S.A. Azimov nomidagi fizika-texnika instituti
Fotoelektronika laboratoriyasi katta ilmiy xodimi, f.-m. f. b. (PhD)*

Mahmudov Mirzavqiy Artiqovish,

*O'zR FA S.A. Azimov nomidagi fizika-texnika instituti
Fotoelektronika laboratoriyasi kichik ilmiy xodimi*

Annotatsiya. Ushbu tadqiqotda KMDO usuli yordamida shisha va Mo qoplangan shisha tagliklarda o'stirilgan surma selenid (Sb₂Se₃) yupqa qatlamlarining kimyoviy tarkibi, morfologiyasi va strukturaviy xossalari tizimli ravishda o'rganildi. EDS tahlili har ikki qatlamda Sb/Se nisbati stexiometrik qiymatga yaqinligini ko'rsatdi. Mo taglikda Se ning biroz yuqoriligi MoSe₂ oraliq qatlami hosil bo'lishi ehtimoli bilan bog'liq deb baholandi. Elementar xaritalash Mo taglikda yaxshiroq yadrolanish va izchil kristall o'sishni tasdiqladi. SEM natijalari Mo ustidagi qatlamlarning zich, mayda donali va yaxshiroq bog'langan tuzilishga ega ekanini ko'rsatdi. XRD ma'lumotlari taglik kristall yo'nalishini sezilarli darajada belgilashini aniqladi: shisha hk0 yo'nalishlarini; Mo esa zaryad tashuvchilar uchun qulay bo'lgan vertikal hkl (211), (221) yo'nalishlarini kuchaytiradi. Raman spektri ortorombik Sb₂Se₃ ning xos Ag tebranish fazalarini tasdiqladi. Natijalar Mo taglikning Sb₂Se₃ ning kristall sifati, tekstura va optoelektron xossalari yaxshilashda muhim afzalliklarga ega ekanini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: KMDO, Mo taglik, shisha taglik, yupqa qatlamlar, kristall yo'nalishi, SEM, XRD, Raman spektroskopiyasi

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЁНОК Sb₂Se₃, ВЫРАЩЕННЫХ НА СТЕКЛЯННЫХ И СТЕКЛО/Mo ПОДЛОЖКАХ МЕТОДОМ ХМПО

Аннотация. В данном исследовании методом ХМПО были синтезированы тонкие пленки Sb₂Se₃ на стеклянных и Mo-покрытых подложках, после чего их химический состав, морфология и структурные свойства были подробно проанализированы. По данным EDS, отношение Sb/Se в обоих образцах близко к стехиометрическому; несколько повышенное содержание Se на подложке Mo связано с вероятным формированием промежуточного слоя MoSe₂. Картирование элементов показало более равномерное распределение и улучшенное зародышеобразование на поверхности Mo. SEM-анализ выявил более плотную, мелкозернистую и структурно связанную морфологию пленки на Mo. Дифракционные данные подтвердили решающую роль подложки в формировании предпочтительной ориентации кристаллов: стекло способствует ориентации hk0, тогда как Mo усиливает вертикальные hkl-фазы (211, 221), благоприятные для транспорта носителей заряда. Спектры Рамана подтвердили характерные колебательные моды Ag орторомбического Sb₂Se₃. Полученные результаты демонстрируют, что подложка Mo значительно улучшает текстуру, структурное качество и оптоэлектронные свойства Sb₂Se₃-пленок.

Ключевые слова: ХМПО, подложка Mo, стеклянная подложка, тонкие пленки, кристаллографическая ориентация, SEM, XRD, рамановская спектроскопия.

MORPHOLOGICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF Sb₂Se₃ THIN FILMS GROWN ON GLASS AND GLASS/Mo SUBSTRATES USING THE CMBD TECHNIQUE

Abstract. In this study, Sb₂Se₃ thin films were deposited on glass and Mo-coated glass substrates via the KMDO method, and their chemical composition, morphology, and structural properties were

comprehensively analyzed. EDS results indicate that both films exhibit an Sb/Se ratio close to stoichiometry, while a slightly higher Se content on the Mo substrate is attributed to the possible formation of a thin MoSe₂ interlayer. Elemental mapping revealed more uniform elemental distribution and improved nucleation on the Mo surface. SEM analysis showed that films grown on Mo possess denser, finer-grained, and more interconnected morphology. XRD results demonstrated that the substrate strongly influences crystal orientation: glass favors hk0-oriented growth, whereas Mo promotes vertically aligned hkl phases such as (211) and (221), which are advantageous for charge carrier transport. Raman spectra confirmed the characteristic Ag vibrational modes of orthorhombic Sb₂Se₃. Overall, the results highlight that Mo-coated substrates significantly enhance texture, structural quality, and optoelectronic properties of Sb₂Se₃ thin films.

Keywords: KMDO, Mo substrate, glass substrate, thin films, crystal orientation, SEM, XRD, Raman spectroscopy.

Kirish. Global miqyosda energiyaga bo'lgan talabning ortib borishi barqaror, ishonchli va iqtisodiy jihatdan maqbul fotoelektr (PV) materiallarini izlashni kuchaytirdi. Hozirda polikristalli kremniy (Si), kadmiy tellurid (CdTe) hamda mis–indiy–galliy selenid (Cu(In,Ga)Se₂, CIGS) quyosh elementlari (QE) da asosiy yutuvchi qatlamlari sifatida qo'llanilmoqda va ularning barchasi 20% dan yuqori sertifikatlangan quvvatni quyosh energiyasiga aylantirish samaradorligiga (FIK) erishgan [1-3]. Biroq Si ishlab chiqarishning yuqori tannarxi, Cd ning toksikligi, Ga va In ning qimmatligi, shuningdek In, Ga hamda Te elementlarining kamyoblighi ushbu materiallardan yupqa qatlamlari QE ni ommaviy ishlab chiqarishda jiddiy muammolarni yuzaga keltiradi [3,4].

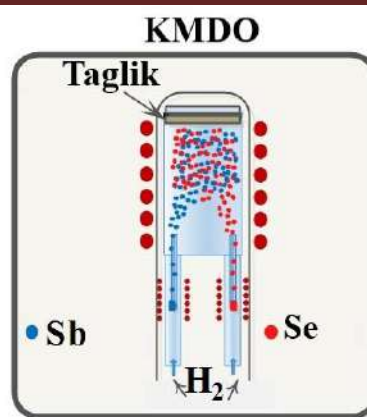
So'nggi o'n yillikda Sb₂Se₃ yupqa qatlamlari QE ning yutuvchi qatlami sifatida katta e'tiborni o'ziga qaratdi. Bunga uning ko'rinadigan yorug'lik diapazonida juda yuqori optik yutilish koeffitsiyenti ($>10^5 \text{ cm}^{-1}$), 1.1-1.3 eV oralig'idagi maqbul taqiqlangan soha kengligi, yuqori zaryad tashuvchilar harakatchanligi ($10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$), past zaharlilik darajasi, oddiy faza kimyosi, arzonligi va elementlarining yuqori tabiiy tarqalganligi sabab bo'lmoqda [5–9]. Shuningdek, Sb₂Se₃ fotoelektrokimyoviy suv parchalash qurilmalarida ham istiqbolli natijalar ko'rsatgan [10–13].

An'anaviy absorberlardan farqli ravishda, Sb₂Se₃ o'ziga xos kvazi-bir o'lchamli (Q1D) kristall tuzilishga ega bo'lib, u [Sb₄Se₆]_n zanjirlardan tarkib topgan. Ushbu zanjirlar o'zaro van-der-Vaals kuchlari bilan, zanjir ichidagi Sb–Se atomlari esa kovalent bog'lar orqali birikkan [6,7,14]. Yaqinda olib borilgan birinchi tamoyillarga asoslangan hisoblashlar shuni ko'rsatdiki, Sb₂Se₃ kristallida zanjirlararo o'zaro ta'sirlar van-der-Vaals va kovalent bog'lanish oralig'ida joylashgan [15]. Boshqa tadqiqotlarda esa [Sb₄Se₆]_n zanjirlarining o'sish yo'nalishini taglikka nisbatan [211] va [221] kristall tekisliklari bo'ylab perpendikulyarga yaqinlashtirish zanjirlarda osilib qolgan bog'larning kamayishiga va tabiatan "zararsiz" don chegaralarining hosil bo'lishiga olib kelishi qayd etilgan [7,16-18]. Shu bilan birga, [001] tekislikdagi zanjirlarning yo'nalishi nurlanmasdan rekombinatsiya yo'qotishlarini sezilarli darajada kamaytirib, Sb₂Se₃ polikristalli yupqa qatlamlarining PV tizimlaridagi samaradorligini oshiradi [19,20].

Ushbu tadqiqotda KMDO usuli yordamida vodorod atmosferasida oddiy shisha va Mo bilan qoplangan shisha sirtlariga o'stirilgan Sb₂Se₃ yupqa qatlamlarning morfologik va strukturaviy hossalari o'rganilgan.

Tajriba qismi. KMDO jarayoni atmosfera sharoitida, nisbatan past haroratlarda alohida manbalaridan o'stirish imkoniyatiga ega bo'lib, Sb₂Se₃ kabi chiziqli polikristall materiallarning yo'naltirilgan o'sishini ta'minlashda samarali usul hisoblanadi. KMDO usuli orqali Sb₂Se₃ yupqa qatlamlarini sintez qilish jarayonida manba sifatida yuqori tozalikka ega (99,999%) Sb va Se granulalaridan foydalanildi (1-rasm). Dastlab, Sb va Se granulalarining zarur miqdorlari FA 120 4C modeli tarozida (aniqligi 0,1 mg) mikro-vaznlash asosida o'lchab olindi. O'lchangan granulalar o'sish kamerasida joylashgan, har bir element uchun maxsus ajratilgan alohida tigellarga ehtiyotkorlik bilan joylashtirildi. So'ngra o'sish tizimi ishchi rejimga keltirildi.

Atmosfera qoldiqlari hamda organik yoki noorganik iflos aralashmalarni butunlay chiqarib yuborish maqsadida kamera vodorod (H_2) gazi bilan tozalandi. Vodorodning yuqori issiqlik o'tkazuvchanligi, kichik molekulyar massasi va molekulyar diametri tufayli parchalanayotgan oqimlarning diffuziya tezligi ortadi, natijada KMDO jarayonida o'sish tezligi inert gazlarga (Ar yoki He) nisbatan 2–3 baravar yuqori bo'lishi ta'minlanadi. Jarayon davomida H_2 oqim tezligi $20 \text{ sm}^3/\text{min}$ qiymatida ushlab turildi va bu parametr *Zach Metalchem* rusumli aniq gazo'tkazgich yordamida doimiy ravishda nazorat qilindi.



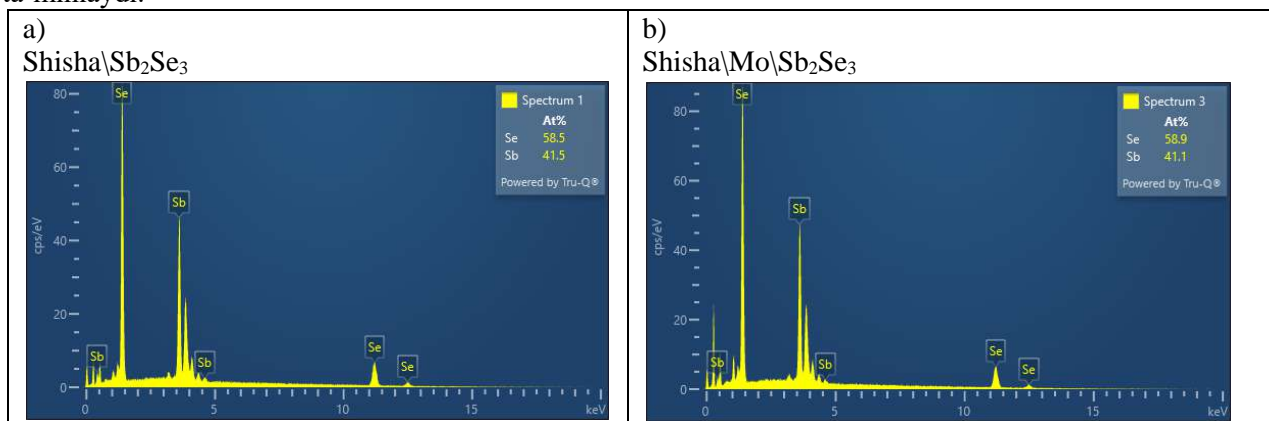
1-rasm. Alohida manbalardan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlari o'tkazish

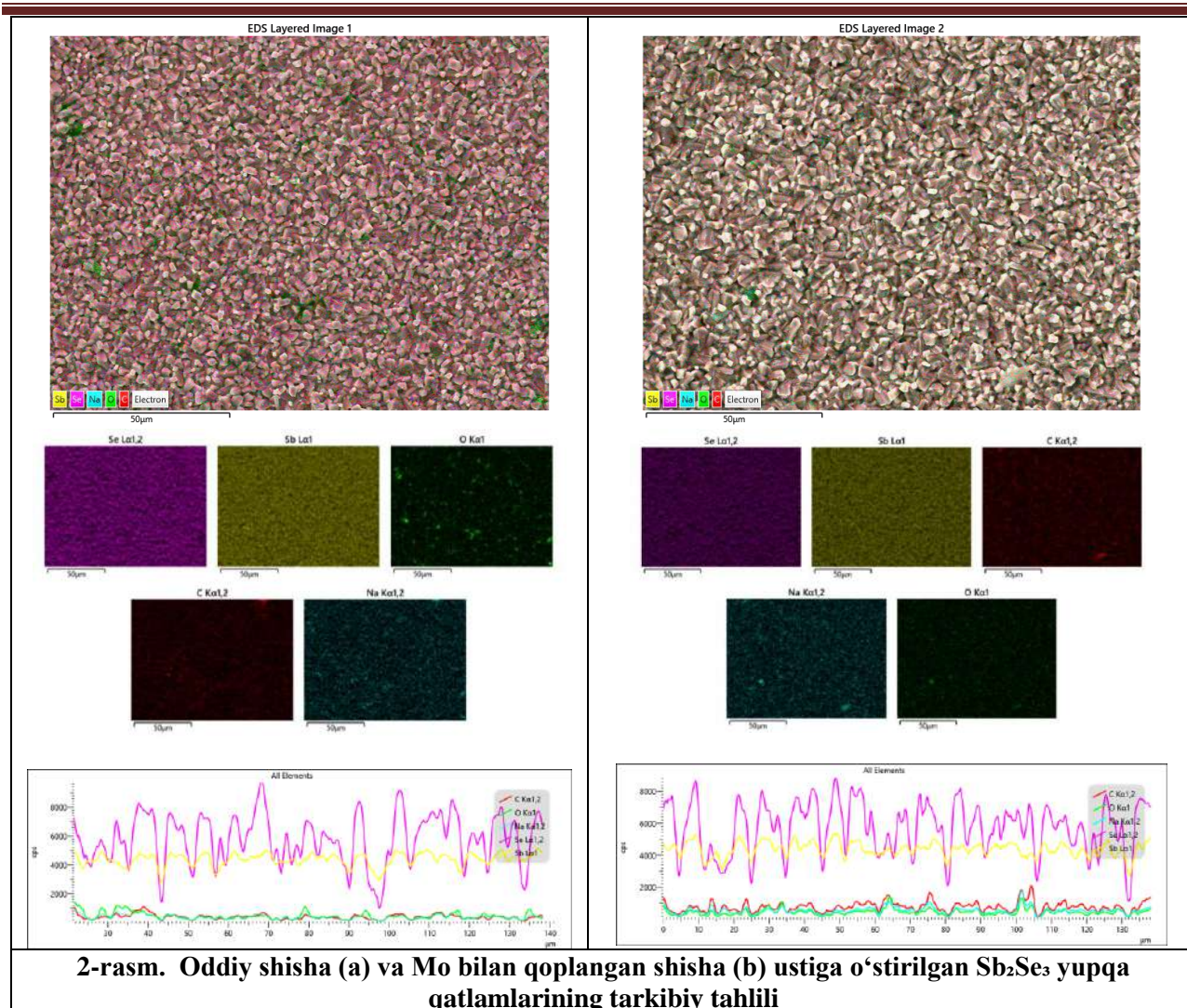
KMDO usulida Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarini olish uchun optimal texnologik rejimlar aniqlanib, tajribalar davomida asosiy parametrlar qat'iy nazorat qilindi. Xususan, manba bo'lgan surma uchun harorat (T_{Sb}) $850 \text{ }^\circ\text{C}$ da, selen manbasi uchun harorat (T_{Se}) esa $440 \text{ }^\circ\text{C}$ da ushlab turildi. Taglik harorati (T_{tag}) $500 \text{ }^\circ\text{C}$ qilib belgilandi va o'stirish jarayoni 30 daqiqa davom ettirildi.

Jarayon davomida 133 mg Sb hamda 150 mg Se sarflanib, ularning atomlar nisbati $Sb/Se = 0,67\text{--}0,70$ at.% diapazonida ta'minlandi, bu esa stixiometrik yaqin tarkibli Sb_2Se_3 fazasini hosil qilishga imkon berdi. Ushbu sharoitlarda sodali-ohak shisha va Mo bilan qoplangan shisha sirtlariga taxminan $2 \text{ }\mu\text{m}$ qalinlikka ega Sb_2Se_3 yupqa qatlamlar muvaffaqiyatli o'stirildi.

Muhokama va natijalar. Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarning morfologiyasini o'rganish materialning sirt tuzilishi, donadorligi, o'sish mexanizmi va strukturaviy birjinsliliigi haqida muhim ma'lumot beradi, chunki bu parametrlar fotoelektrik xususiyatlarning shakllanishida hal qiluvchi rol o'ynaydi. Shuning uchun, morfologik evolyutsiyani baholash va qatlam sifatini aniqlashtirish maqsadida Sb_2Se_3 yupqa qatlamlari ustida morfologik tadqiqotlari olib borildi. Tadqiqot Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarining kimyoviy tarkibini energiya-dispersiv spektroskopiyasi (EDS) yordamida baholashdan boshlandi.

2-rasmda sodali ohak shisha (a) va Mo bilan qoplangan shisha (b) tagliklarida KMDO usuli orqali o'stirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarning tarkibiy xususiyatlari EDS spektri, elementlarning fazoviy taqsimoti (mapping) va line-scan profillari asosida taqqoslab berilgan. Har ikkala taglik uchun ham EDS spektrlarida Sb va Se elementlariga tegishli asosiy energiya cho'qqilari aniq kuzatiladi. Shakllangan donacha ustida olingan EDS spektr tahlili Sb/Se nisbati sxitiometrik tarkibga yaqin ekanligini ya'ni shisha va Mo qoplangan shisha uchun mos ravishda 0.70 va 0.69 ga tengligini ko'rsatdi. Sb_2Se_3 ning nazariy stixiometriyasiga yaqin bo'lgani olingan qatlamlarda kimyoviy tarkibning barqaror shakllanganini ko'rsatadi. Mo qoplamasi ustiga o'stirilgan namunada Se ulushi nisbatan yuqoriroq bo'lgani, o'sish jarayonining dastlabki bosqichida Mo sirtida nozik $MoSe_2$ oraliq qatlamining shakllanishi bilan ham bog'liqdir. $MoSe_2$ ning hosil bo'lishi Mo–Se reaksiyasining terfazainamik jihatdan qulayligi orqali sodir bo'lib, ushbu qatlam Sb_2Se_3 ning keyingi o'sishi uchun reaktiv va sirt-energiyasi yuqori bo'lgan interfeys yaratadi. Shu sababli Mo sirtining reaktiv o'sishni rag'batlantiruvchi xususiyati va Se atomlarining kondensatsiya jarayonida yuqori barqarorligi birgalikda, Mo yuzasida Sb_2Se_3 kristallarining ancha tartibli, yo'naltirilgan va strukturaviy jihatdan izchil o'sishini ta'minlaydi.





2-rasm. Oddiy shisha (a) va Mo bilan qoplangan shisha (b) ustiga o‘stirilgan Sb_2Se_3 yuqqa qatlamlarining tarkibiy tahlili

Elementlarning fazoviy taqsimotiga ko‘ra, shisha taglikdagi namunada Se va Sb elementlarining taqsimoti nisbatan bir xil bo‘lsa-da, xaritada ayrim joylarda lokal zichlik farqlari kuzatiladi. Bu shisha sirtining kimyoviy passivligi va past energiyali bo‘lishi tufayli yadrolanishning notekis boshlanishi bilan bog‘liq. Shisha/Mo tagligida esa Sb va Se elementlari butun sirt bo‘ylab yanada bir xilda, zich va izchil taqsimlangan. Bu Mo yuzasining yuqori sirt energiyasi, diffuzion o‘shni aktivlashtirishi hamda Sb va Se atomlarining oson adsorbsiyasi natijasida barqaror kristall hosil bo‘lishini ko‘rsatadi.

Chiziqli (line-scan) profillarida Sb va Se intensivliklari har ikki taglikda deyarli parallel o‘zgarishlarga ega bo‘lib, qatlamlar stexiometrik Sb_2Se_3 fazasiga mos keladi. Biroq Shisha/Mo taglikdagi profil ancha tekis, past shovqinli va zich, bu esa tarkibiy bir xillik yuqoriroq ekanini ko‘rsatadi. Shisha taglikdagi namunada esa Sb va Se signallarida davriy mayda fluktuatsiyalar mavjud bo‘lib, donachalararo bo‘shliq va sirt notekisligidan kelib chiqqan.

Shuningdek, EDS xaritalarida kuzatilgan Na, O va C elementlarining mavjudligi Sb_2Se_3 fazasining o‘ziga xos kimyoviy tarkibiga tegishli emas. Na signalining paydo bo‘lishi vakuumsiz KMDO jarayonida taglik materialidan yuqori harorat ta‘sirida yuzaga keladigan Na diffuziyasi bilan izohlanadi. Oddiy shisha tagligida Na^+ ionlarining yuqoriga ko‘tarilishi tabiiy bo‘lsa, Mo qoplamasi mavjud holatda ham Na ning juda past miqdordagi izlari KMDO jarayoni davomida taglik chetlari, taglikning mikro yoriqlari yoki KMDO reaktori ichki devorlaridan ikkilamchi diffuziya orqali kirib kelishi mumkin. O elementi signallarining kuzatilishi KMDO qurilmasining vakuumsiz, vodorod bilan boyitilgan ishchi muhitida qolgan oz miqdordagi kislorod izlari bilan reaksiyaga kirishishi yoki o‘shidan oldingi bosqichlarda taglik yuzasida saqlanib qolgan oksid va gidroksil guruhlar bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. KMDO jarayonida suvli eritma bo‘lmasa-da, havodagi namlik, texnologik tozalash jarayoni yoki reaksiyon kameraning ichki yuzalarida adsorbsiyalangan O/OH guruhlar ushbu elementning paydo bo‘lishiga sabab bo‘ladi. C signali esa odatda KMDO jarayonining ochiq/vakuumsiz sharoitda amalga oshirilishi tufayli yuzaga keladigan atmosferadagi organik

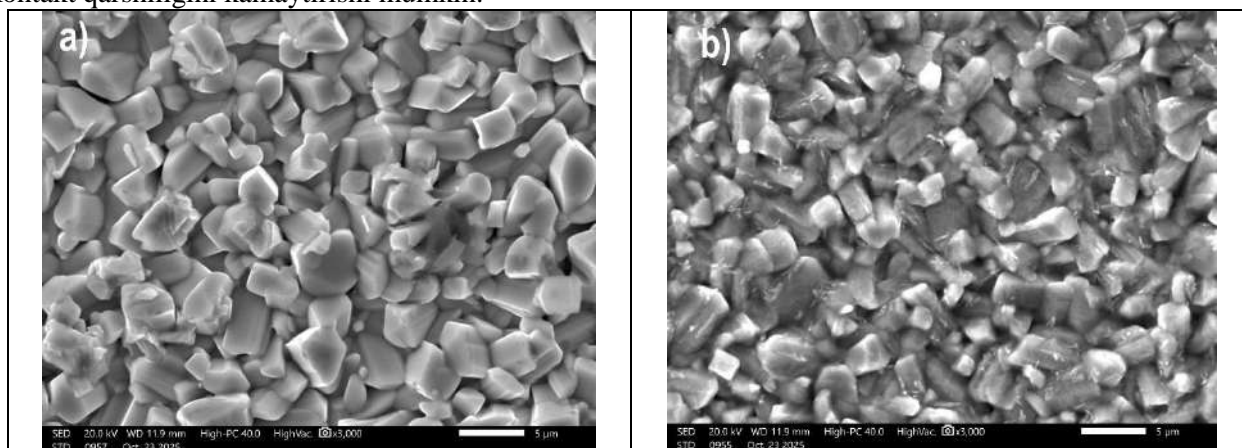
aerozollar, kimyoviy tozalash jarayoni qoldiqlari bilan izohlanadi. Bu C signalining juda past intensivlikda bo'lishi uning Sb_2Se_3 kristall strukturasi qatnashmasligini tasdiqlaydi.

Ushbu Na, O va C elementlarining intensivligi fon darajasiga yaqin bo'lib, ular Sb_2Se_3 fazasida strukturaviy yoki kimyoviy rol o'ynamaydi. Bu holat olingan qatlamlarning KMDO qurilmasi uchun yetarli kimyoviy tozalikda, asosiy tarkibdan chetlashmagan holda o'sganini tasdiqlaydi.

3a - rasmda shisha taglik ustiga o'stirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamining yuzasi zich, bir-biriga yaqin joylashgan va keskin qirralangan donachalardan tashkil topganligini ko'rish mumkin. Donachalar o'rtacha o'lchamlari 0.5–2 μm oralig'ida bo'lib, polikristall tuzilishga ega va nisbatan yirik donachali morfologiya kuzatildi. Donachalarning qirralangan, tekis yuzali shakli ularning kristallografik yo'naltirilgan o'sishi bilan bog'liq ekanligini ko'rsatadi.

Sirt nisbatan tekis va zich, katta bo'shliqlar yoki ochiq bo'shliqlar ko'zga tashlanmaydi. Biroq donachalar orasidagi chegaralar aniq ko'rinadi. Bu elektr xususiyatlar (hamda fotovoltaik qurilmalar uchun) nuqtai nazaridan donachalar chegaralari orqali rekombinatsiya manbalari paydo bo'lishi mumkin.

Mo qoplangan shisha ustiga o'stirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamining donachalar nisbatan kichikroq bo'lib, donchalarning o'lchamlari 300 nm – 1.5 μm oralig'ida yotadi (3b-rasm). Sirtida donalar zich va bir-biriga yaqin joylashgan hamda bo'shliqlar juda kam ekanligini ko'rish mumkin. Bundan tashqari KMDO sharoitida Se bilan o'zaro ta'sir natijasida $MoSe_2$ yupqa qatlami hosil bo'lishi ehtimoli yuqori bo'ladi. $MoSe_2$ sirti epitaksiyaga o'xshash yoki yo'naltirilgan yadrolanish nuqtalarini ta'minlab, Sb_2Se_3 kristallarining katta, tartibli o'sishiga imkon beradi. Shuning uchun $MoSe_2$ yupqa qatlami elektr kontakt sifatini yaxshilashi, kontakt qarshiligini kamaytirishi mumkin.



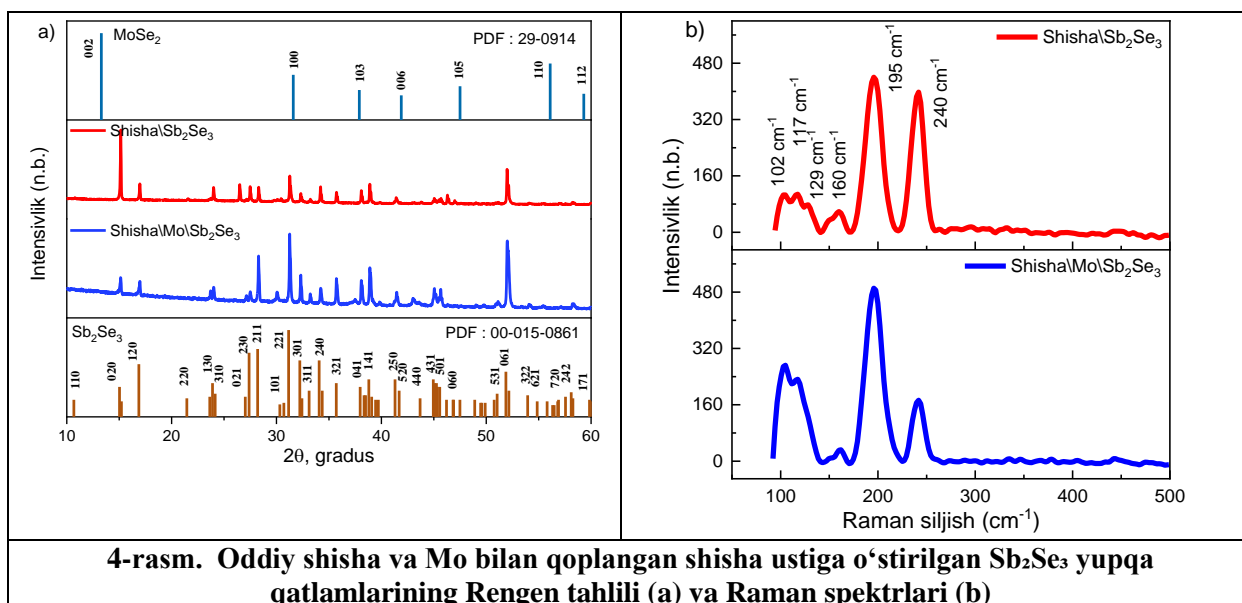
3-rasm. Oddiy shisha (a) va Mo bilan qoplangan shisha (b) ustiga o'stirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarining SEM tasvirlari

Oddiy shisha (a) va Mo bilan qoplangan shisha (b) tagliklarida KMDO usuli yordamida o'stirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarning kristall tuzilmasini chuqur tahlil qilish, ushbu tagliklarning panjara shakllanishi va fazaviy evolyutsiyaga ko'rsatadigan ta'sirini aniqlash uchun muhim ahamiyatga ega. Taglik materiali va uning sirt xususiyatlari donalarning yo'nalganligi, kristall o'sish kinetikasi hamda fazaviy barqarorlikka sezilarli ta'sir ko'rsatishi sababli, strukturaviy tadqiqotlar keyingi optik, elektr va morfologik xossalarning shakllanish mexanizmlarini tushunishda asosiy bosqich hisoblanadi. Shu maqsadda, 500 °C taglik haroratida o'stirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarining kristall tuzilmasi va fazaviy tarkibini aniqlash uchun rentgen difraksiyasi (XRD) tahlili o'tkazildi. XRD - monoxromatik rentgen nurlarining kristall panjara bilan konstruktiv interferensiyasiga asoslangan kuchli tavsiflash usuli bo'lib, difraksion cho'qqilarning 2 θ burchagi va intensivligi orqali fazalar mavjudligi, panjara oralig'i, kristallanish darajasi hamda donalarning afzal yo'nalganligi to'g'risida aniq ma'lumot beradi.

4a-rasmda Sb_2Se_3 va $MoSe_2$ ning kartotekalariga (mos ravishda JCPDS 00-015-0861 va 29-0914) muvofiq oddiy shisha va Mo bilan qoplangan shisha ustiga o'stirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarining Rengen tahlillari keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, ikki xil taglikda o'stirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarda ham bir xil cho'qqilar (020, 120, 130, 230, 211, 221, 301, 240, 041, 141, 431, 501 va 061) kuzatilgan bo'lib, ularning intensivliklari taglikning turiga qarab turlicha bo'ldi. Shisha taglikda o'stirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarda asosan hk0 yo'nalishidagi cho'qqilar (020, 120, 130, 230 va 240) dominantlik qilganini ko'rish mumkin. Bundan shisha taglikda Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarning donachalari asosan taglikka parallel shakllanishi ma'lum bo'ladi. Aksincha, Mo bilan qoplangan shisha ustiga o'stirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarda esa donachalar asosan taglikka tik hkl ($k=0, 1$ va 2) yo'nalishida (211, 221, 301, 041, 141, 431 va 501) shakllanishi ma'lum bo'ladi. Bunda dominantlik qilgan ikki aniq difraksiya cho'qqisi (211) va (221) kristall tuzilmasining ($hk1$) xususiyatli kristallografik yo'nalishini ko'rsatadi, bu esa $Sb_2S(e)_3$ kristallarining

maxsus tuzilishi sababli eng samarali zaryad tashuvchilar yoʻnalishi hisoblanadi. Bu kristallar $(Sb_4S(e)_6)_n$ lentalaridan iborat boʻlib, Van-der-Vaals kuchlari bilan (010) va (100) yoʻnalishlarida bogʻlanadi [21,22]. Shuningdek, taglik shishadan Mo qoplangan shishaga oʻzgarganda intensivligi sezilarli ortgan (061) choʻqqi ham, $(Sb_4S(e)_6)_n$ lentasimon tuzilmalarning taglikka nisbatan vertikal joylashganini koʻrsatadi. Bu yoʻnalish ham zaryad tashuvchilar uchun qulay oqim yoʻllarini hosil qilishi mumkin.

Mo bilan qoplangan shisha ustiga oʻstirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlari choʻqqilarini $MoSe_2$ kartotekasidagi intensivlik choʻqqilari bilan taqqoslanganda yaqqol $MoSe_2$ ni ifodalaydigan choʻqqi kuzatilmadi. Bunga asosiy sabab Sb bilan Se manbalarini bir vaqtda bugʻlatilganligi natijasida XRD da kuzatilishi uchun yetarli qalinlikda $MoSe_2$ yupqa qatlami hosil boʻlmagani boʻlishi mumkin. Keyingi tadqiqotlarda Se manbasini biroz ertaroq bugʻlatish maqsad qilindi.



4b-rasmda 785 nm lazer chizigʻi yordamida oʻlchangan Raman spektroskopiyasi natijalari asosida sodali-ohak shisha va Mo qoplangan shisha tagliklarida oʻstirilgan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarining xos tebranish fazalari taqdim etilgan. Sb_2Se_3 kristallining Raman spektridagi choʻqqilar uning kristall panjarasida joylashgan atomlarning xarakterli tebranish fazalarini aks ettirib, Sb–Se bogʻlari hamda ortorombik kristall simmetriyasi bilan bevosita bogʻliqdir.

Romboedrik Se_6 halqalari bilan assotsiatsiyalangan 102 va 129 cm^{-1} dagi choʻqqilar ushbu halqali strukturalarning tebranishlariga mos keladi [23]. 117 cm^{-1} dagi Raman choʻqqi ortorombik Sb_2Se_3 fazasining Ag tipidagi past chastotali panjara tebranish rejimi boʻlib, materialning fazaviy tozaligi va strukturaviy barqarorligini tasdiqlaydi. 160 cm^{-1} dagi choʻqqi Sb_2Se_3 ning ortorombik fazasiga xos Ag simmetriyalı ichki vibratsion faza boʻlib, Sb–Se bogʻlarining kuchaygan choʻzilish tebranishini ifodalaydi. 195 cm^{-1} dagi tebranish Sb_2Se_3 kristall panjarasida mavjud yuqori energiyali Ag simmetriyalı ichki choʻzilish rejimi sifatida baholanib, Sb–Se kovalent bogʻlarining kuchli dinamik javobini aks ettiradi. 240 cm^{-1} atrofidagi Raman choʻqqi ortorombik Sb_2Se_3 fazasi uchun xos boʻlgan yuqori chastotali Ag turidagi ichki vibratsiya rejimiga mansub boʻlib, Sb–Se bogʻlarining lokal yuqori energiyali tebranishlarini ifodalaydi [24–26].

Shisha va Mo qoplama ustida oʻstirilgan Sb_2Se_3 qatlamlaridagi Raman intensivliklaridagi farq taglikning film bilan mexanik bosim, sirt kimyosi, hamda optik interferensiya sharoitiga taʼsiri bilan izohlanadi. Sodali-ohak shisha sirtida ichki Sb–Se bogʻlarining kuchli choʻzilish tebranishlarini kuchaytirib, yuqori chastotali 160 va 240 cm^{-1} choʻqqilarining intensivligini oshiradi, Mo-qoplangan shishada yupqa qatlam bilan kuchliroq interfaol bogʻlanish (mexanik bosim, reflektivlik va yaxshiroq tekstura) hosil qilib, past va oʻrta chastotali Ag rejimlari (102, 117, 129, 195 cm^{-1}) ning Raman sezgirligini orttiradi [24–26].

Xulosa. Oʻtkazilgan tahlillar Mo qoplangan taglikning Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarining oʻsishi va ularning fizik xossalari sezilarli taʼsir koʻrsatishini tasdiqladi. Mo taglikda yanada zich, izchil va vertikal yoʻnalgan kristall tuzilish shakllandi, bu esa samarali zaryad transporti uchun qulay sharoit yaratadi. Shisha taglikda kuzatilgan $hk0$ yoʻnalishlar oʻrniga Mo taglikda (211) va (221) kabi yuqori samaradorlikka yoʻnaltirilgan fazalar ustunlik qildi. Raman, SEM va XRD natijalari kompleks tarzda Mo taglikning struktura sifatini oshiruvchi rolini koʻrsatdi. Shu sababli, Mo bilan qoplangan taglik Sb_2Se_3 asosidagi fotoelektrik va optoelektron qurilmalar uchun eng istiqbolli tagliklardan biri hisoblanadi.

ADABIYOTLAR:

1. A. Mavlonov, T. Razykov, F. Raziq, J. Gan, J. Chantana, Y. Kawano, T. Nishimura, H. Wei, A. Zakutayev, T. Minemoto, *Sol. Energy*, 2020, 201, 227–246.
2. M. Green, E. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 2021, 29, 3–15.
3. R. Scheer, H.-W. Schock, *Chalcogenide Photovoltaics: Physics, Technologies, and Thin Film Devices*, John Wiley & Sons, 2011.
4. A. Zakutayev, *Curr. Opin. Green Sustainable Chem.*, 2017, 4, 8–15.
5. C. Chen, D. C. Bobela, Y. Yang, S. Lu, K. Zeng, C. Ge, B. Yang, L. Gao, Y. Zhao, M. C. Beard, *Front. Optoelectron.*, 2017, 10, 18–30.
6. H. Lei, J. Chen, Z. Tan, G. Fang, *Sol. RRL*, 2019, 3, 1900026.
7. O. S. Hutter, L. J. Phillips, K. Durose, J. D. Major, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2018, 188, 177–181.
8. Y. Zhou, M. Leng, Z. Xia, J. Zhong, H. Song, X. Liu, B. Yang, J. Zhang, J. Chen, K. Zhou, *Adv. Energy Mater.*, 2014, 4, 1301846.
9. S. Ghosh, M. Moreira, C. Fantini, J. González, *Sol. Energy*, 2020, 211, 613–621.
10. S. Chen, T. Liu, Z. Zheng, M. Ishaq, G. Liang, P. Fan, T. Chen, J. Tang, *J. Energy Chem.*, 2022, 67, 508–523.
11. J. Tan, W. Yang, H. Lee, J. Park, K. Kim, O. S. Hutter, L. J. Phillips, S. Shim, J. Yun, Y. Park, *Appl. Catal. B*, 2021, 286, 119890.
12. W. Yang, J. H. Kim, O. S. Hutter, L. J. Phillips, J. Tan, J. Park, H. Lee, J. D. Major, J. S. Lee, J. Moon, *Nat. Commun.*, 2020, 11, 1–10.
13. W. Yang, J. Park, H.-C. Kwon, O. S. Hutter, L. J. Phillips, J. Tan, H. Lee, J. Lee, S. D. Tilley, J. D. Major, *Energy Environ. Sci.*, 2020, 13, 4362–4370.
14. K. Zeng, D.-J. Xue, J. Tang, *Semicond. Sci. Technol.*, 2016, 31, 063001.
15. X. Wang, Z. Li, S. R. Kavanagh, A. M. Ganose, A. Walsh, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2022, 24, 7195–7202.
16. Z. Li, X. Liang, G. Li, H. Liu, H. Zhang, J. Guo, J. Chen, K. Shen, X. San, W. Yu, *Nat. Commun.*, 2019, 10, 1–9.
17. L. Wang, D.-B. Li, K. Li, C. Chen, H.-X. Deng, L. Gao, Y. Zhao, F. Jiang, L. Li, F. Huang, *Nat. Energy*, 2017, 2, 1–9.
18. R. Kondrotas, J. Zhang, C. Wang, J. Tang, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2019, 199, 16–23.
19. Y. Zhou, L. Wang, S. Chen, S. Qin, X. Liu, J. Chen, D.-J. Xue, M. Luo, Y. Cao, Y. Cheng, *Nat. Photonics*, 2015, 9, 409–415.
20. R. E. Williams, Q. M. Ramasse, K. P. McKenna, L. J. Phillips, P. J. Yates, O. S. Hutter, K. Durose, J. D. Major, B. G. Mendis, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12, 21730–21738.
21. X. Wang, K. Kunc, I. Loa, U. Schwarz, and K. Syassen, “Effect of pressure on the Raman modes of antimony,” *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 74, no. 13, p. 134305, 2006.
22. Y. Liu et al., “Nanorod array-induced growth of high-quality Sb₂Se₃ absorber layers for efficient planar solar cells,” *J Alloys Compd*, vol. 949, p. 169729, 2023.
23. Zhou et al., *J. Phys. Chem. C*, 2020, 124, 23456–23463
24. Wang et al., *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6, 10592–10601
25. Liu et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11, 15564–15572
26. Chen et al., *Opt. Mater. Express*, 2017, 7, 1274–1283

FORMATION OF NICKEL NANOCCLUSERS IN P-TYPE SILICON: INFLUENCE ON ELECTROPHYSICAL PROPERTIES AND SURFACE TOPOGRAPHY

Turabdjano Sadritdin Makhamatdinovich,

Rector of the Tashkent State Technical University

Kenjaev Zoir Tokhir ugli,

Associate Professor at Tashkent State Technical University

Kulumbetov Adilbek Sayt-Muratovich,

PhD student at Chirchik State Pedagogical University

adilbek.kulumbetov@gmail.com

Abstract. The effect of diffusion nickel doping on the properties of monocrystalline p-type silicon ($0.5 \Omega\text{-cm}$), grown by the Czochralski method, was investigated. Nickel diffusion was carried out at 1200°C followed by annealing at 800°C , which promoted the formation of nanoclusters with sizes ranging from 50 to 300 nm within surface pores. Atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM) were used to analyze the surface topography, and the van der Pauw method was used to measure electrophysical parameters. It was established that the electrophysical properties remain largely unchanged: the specific resistivity was $0.523 \Omega\text{-cm}$ and the carrier mobility was $263 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. The formation of nanoclusters and the absence of changes in the specific resistivity are associated with the gettering of electrically neutral nickel impurity atoms, which improves the lifetime of nonequilibrium charge carriers. The results confirm the potential of this method for optimizing solar cells and microelectronic devices.

Key words: silicon, nickel, nickel doping, nanoclusters, diffusion, gettering, electrophysical properties, solar cells.

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОКЛАСТЕРОВ НИКЕЛЯ В КРЕМНИИ Р-ТИПА: ВЛИЯНИЕ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТОПОГРАФИЮ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация. Исследовано влияние диффузионного легирования никелем на свойства монокристаллического кремния р-типа ($0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), полученного методом Чохральского. Проведена диффузия никеля при 1200°C с последующим отжигом при 800°C , что способствовало формированию нанокластеров размером 50–300 нм в порах на поверхности. Использованы атомно-силовая (АСМ) и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) для анализа топографии, а метод Ван дер Пау-для измерения электрофизических параметров. Установлено, что электрофизические параметры остаются без существенного изменения: удельное сопротивление $0,523 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и подвижности носителей $263 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Формирование нанокластеров и отсутствие изменения удельного сопротивления связано с геттерированием электронейтральных примесных атомов никеля, что улучшает время жизни неравновесных носителей заряда. Результаты подтверждают перспективность метода для оптимизации солнечных элементов и микроэлектроники.

Ключевые слова: кремний, никель, легирование никелем, нанокластеры, диффузия, геттерирование, электрофизические свойства, солнечные элементы.

P-TURDAGI KREMNIYDA NIKEL NANOKLASTERLARINING SHAKLLANISHI: ELEKTRO-FIZIK XOSSALAR VA SIRT TOPOGRAFIYASIGA TA'SIRI

Annotatsiya. P-turdagi ($0,5 \Omega\text{-sm}$) Chokhralskiy usuli bilan olingan monokristalli kremniyning xossalari nikel diffuzion legirlashining ta'siri o'rganildi. 1200°C da nikel diffuziyasi va 800°C da keyingi qizdirish jarayoni amalga oshirildi, bu esa sirt teshiklarida 50–300 nm o'lchamli nanoklasterlarning shakllanishiga olib keldi. Sirt topografiyasini tahlil qilish uchun atom-kuch mikroskopiyasi (AFM) va skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) qo'llanildi, elektrofizik parametrlarni o'lchash uchun esa van der Pauw usuli qo'llanildi. Tadqiqot natijasida elektrofizik parametrlar sezilarli o'zgarishsiz qolgani aniqlandi: solishtirma qarshilik $0,523 \Omega\text{-sm}$, tashuvchilar harakatchanligi $263 \text{ sm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ni tashkil etdi. Nanoklasterlarning shakllanishi va solishtirma qarshilikning o'zgarishsizligi nikelning elektr neytral kirishma atomlarining getterlanishi bilan izohlanadi, bu esa muvozanatsiz zaryad tashuvchilarning umrini yaxshilaydi. Olingan natijalar ushbu usulning quyosh elementlari va mikroelektronika uchun istiqbolli ekanini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: kremniy, nikel, nikel bilan legirlash, nanoklastlar, diffuziya, getterlash, elektrofizik xossalari, quyosh elementlari.

Introduction. Silicon remains a key material in semiconductor electronics due to the possibility of modifying its properties by alloying [1]. The introduction of transition metals such as nickel makes it possible to control defects and getter impurities, improving the parameters of devices such as solar cells and integrated circuits [2]. However, nickel cluster formation in p-type silicon, especially at high temperatures (>1000 °C), remains insufficiently studied, which makes it difficult to obtain materials with high uniformity [3]. Clusters can cause local defects that affect the resistivity, mobility, and lifetime of charge carriers. The literature shows that nickel diffusion at T=800-850 °C improves the efficiency of solar cells by 20-30% due to gettering [4, 5]. In [4], the nickel concentration in the near-surface zone exceeded the volume concentration by 2-3 orders of magnitude, and the binding energy of the clusters was ~1.39 eV. However, high-temperature regimes (>1000 °C) remain poorly investigated, although they may enhance clustering. The purpose of the work: to study the formation of nickel nanoclusters in p-type silicon during diffusion at 1200 °C and to evaluate their effect on electrophysical properties and surface topography. In the last two decades, there has been a growing interest in studying the behavior of transition metals in silicon under high-temperature processing conditions, driven by advances in micro- and nanoelectronics as well as photovoltaic technologies [6–8]. It has been established that nickel atoms exhibit high diffusion mobility in silicon and are capable of forming both localized defect complexes and larger cluster-like formations depending on the temperature–time parameters of thermal treatment [6,7]. Several studies have shown that at temperatures above 1000 °C, diffusion processes are accompanied by significant redistribution of impurities and modifications of the defect structure in the near-surface layers of silicon [8,9]. In this context, surface morphology, including pore formation and cluster aggregation, may indirectly influence the electrophysical properties of the material [9,10]. Despite the availability of individual experimental and theoretical studies, the relationship between high-temperature nickel diffusion, impurity clustering, and changes in the electrophysical parameters of p-type silicon remains insufficiently investigated, which determines the relevance of the present work [11,12]. A significant contribution to understanding the role of metal impurities in silicon has been made by studies focusing on the influence of transition-metal clustering on recombination processes and charge carrier transport [13–15]. It has been demonstrated that the formation of metal-containing clusters and defect complexes can either reduce the concentration of recombination-active centers or introduce additional trapping sites, depending on their size and spatial distribution [13,14]. Particular attention has been paid to near-surface regions of silicon, where high-temperature processing promotes the development of complex surface morphology and inhomogeneous impurity redistribution, which may indirectly affect the electrophysical properties of the material [15–17]. These effects are especially relevant for p-type silicon, where recombination activity and defect distribution strongly influence carrier transport. Overall, the reported results emphasize the necessity of a combined structural and electrical analysis to reliably assess the role of nickel clustering under high-temperature diffusion conditions [18].

Materials and methods. The study was conducted on p-type monocrystalline silicon wafers (Czochralski-grown, boron-doped) with a resistivity of 0.50 Ω·cm and a carrier concentration of $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. A 1 μm thick layer of nickel was deposited onto the surface by vacuum evaporation at 10^{-6} Torr. Diffusion of nickel impurity atoms was carried out at T = 1200 °C for 30 minutes, followed by annealing at T = 800 °C for 30 minutes to activate the gettering process. The surface topography was investigated using an FM-Nanoview 1000 atomic force microscope and a Jeol JSM-IT200LA scanning electron microscope operated at an accelerating voltage of 20 kV. Electrophysical parameters were measured using the Ecopia HMS 3000 van der Pauw method at T = 25 °C. The data were processed using Gwyddion software (AFM) and ImageJ (SEM).

Results and discussion. Van der Pauw measurements showed that after nickel doping the carrier concentration was $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, the resistivity was 0.523 Ω·cm, and the carrier mobility was 263 cm²/V·s. Table 1 compares the parameters before and after the treatment.

Table 1. Electrophysical parameters of p-type conductive silicon

Sample	Carrier concentration, cm ⁻³	Resistivity, Ω·cm	Mobility, cm ² /v·s
Initial	3×10^{16}	0,5	250
After Ni diffusion	4×10^{16}	0,523	263

AFM and SEM revealed triangular-shaped pores with side lengths of 300–2800 nm, inside which spherical nickel nanoclusters with diameters of 50–300 nm are located.

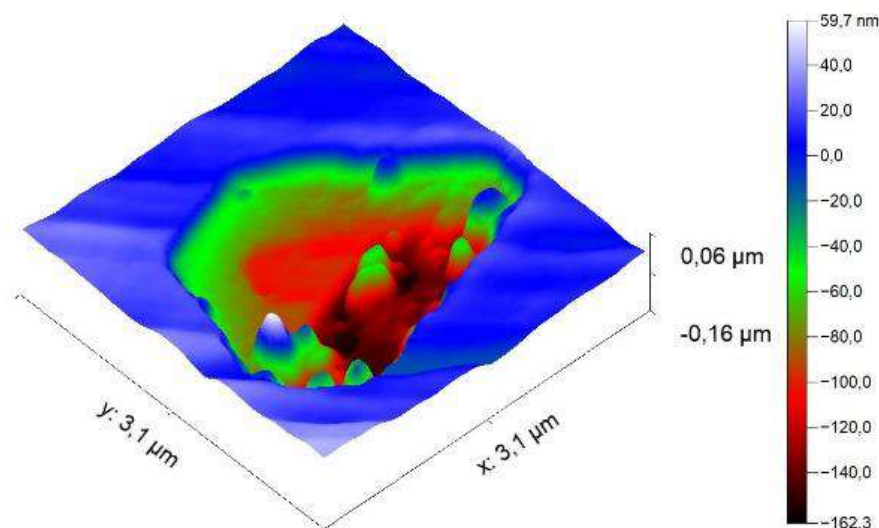


Figure 1. AFM image of the p-type silicon surface after nickel diffusion, showing pore and nanoclusters (scale $3 \times 3 \mu\text{m}$)

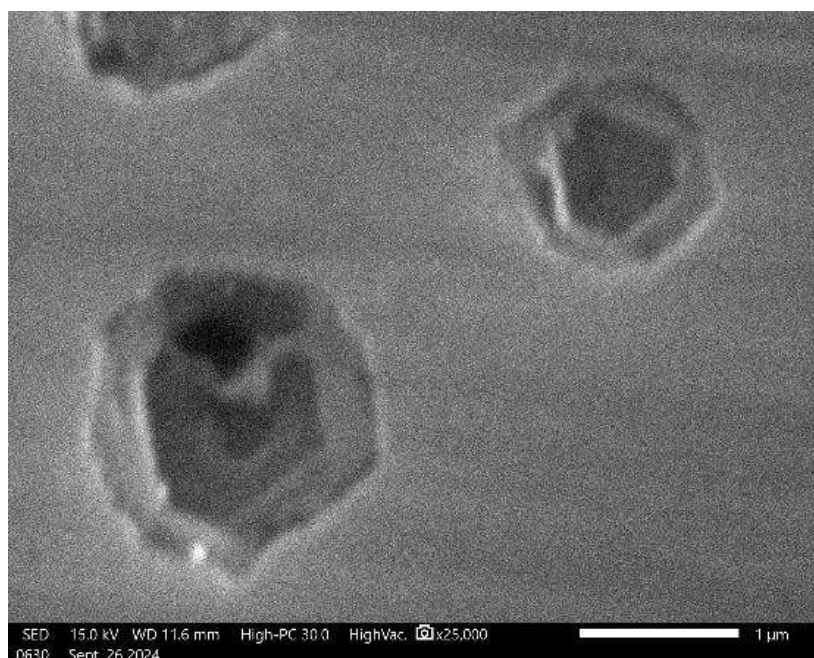


Figure 2. SEM image of nickel nanoclusters inside pores (scale bar $1 \mu\text{m}$)

The formation of nickel nanoclusters is explained by the emergence of metallic bonding between nickel and fast-diffusing impurities. The cluster binding energy ($\sim 1.39 \text{ eV}$ [4]) stabilizes them, promoting the gettering of impurities (O, C), which increases the carrier lifetime (estimated by 2 times, as in [5]).

It was established that the electrophysical parameters remain essentially unchanged: the resistivity is $0.523 \Omega \cdot \text{cm}$ and the carrier mobility is $263 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. The formation of nanoclusters and the absence of changes in resistivity are attributed to the gettering of electrically neutral nickel impurity atoms, which enhances the lifetime of nonequilibrium charge carriers.

However, $T = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ is higher than the optimal range ($T = 800\text{--}850 \text{ }^\circ\text{C}$ [3, 4]), which may lead to excessive defect formation. A comparison with Ref. [4] shows that at $800 \text{ }^\circ\text{C}$ the mobility reaches $270 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, which is 2.7% higher.

Conclusion. Nickel diffusion at $T = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ forms nanoclusters with diameters of $50\text{--}300 \text{ nm}$ inside triangular pores with side lengths of $300\text{--}2800 \text{ nm}$ on the surface of p-type silicon. Impurity gettering by nickel is promising for solar cell applications but requires reducing the diffusion temperature to $800\text{--}850 \text{ }^\circ\text{C}$. Further investigation is needed using DFT modeling and TEM to analyze the internal structure of the clusters.

REFERENCES:

1. Sze, S.M., Ng, K.K. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley, 2006.
2. Pan, Y., et al. *Precise p-type and n-type doping of two-dimensional semiconductors*. *Nat. Commun.* 15, 9631 (2024). DOI:10.1038/s41467-024-54050-2
3. Бахадырханов, М.К., et al. *Повышение эффективности кремниевых солнечных элементов легированием никелем*. *Журнал БГУ. Физика*, 3, 32–39 (2021). DOI:10.33581/2520-2243-2021-3-4-12
4. Kenjajev, Z.T., et al. *Increasing the Efficiency of Silicon Solar Elements by Doping with Nickel*. *Elektron. Obrabotka Materialov* 59(3), 61–70 (2023). DOI:10.52577/eom.2023.59.3.61
5. Bakhadyrkanov, M.K., et al. *Effect of nickel on the lifetime of charge carriers in silicon solar cells*. *Semiconductors* 56(1) (2022). DOI:10.21883/FTP.2022.01.51823.9642
6. Buonassisi, T., Istratov, A.A., Marcus, M.A., et al. *Engineering metal-impurity nanodefects for low-cost solar cells*. *Nature Materials* 4(9), 676–679 (2005). DOI:10.1038/nmat1457
7. Schroder, D.K. *Semiconductor Material and Device Characterization*. 3rd ed., Wiley, 2006.
8. Simoen, E., Claeys, C. *Bulk defects and impurities in silicon devices*. *Materials Science and Engineering B* 154–155, 78–86 (2008).
9. Pizzini, S. *Advanced Silicon Materials Science and Technology*. Wiley, 2012.
10. Coletti, G. *Sensitivity of crystalline silicon solar cells to metal impurities*. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* (2012).
11. Murphy, J.D., et al. *Minority carrier lifetime in silicon photovoltaics: The effect of...* *Solar Energy Materials and Solar Cells* (2014).
12. Macdonald, D., Cuevas, A. *Validity of Shockley–Read–Hall statistics for modeling carrier lifetimes in silicon*. *Physical Review B* 67, 075203 (2003).
13. Buonassisi, T., et al. *Metal impurities in silicon devices: Impact on recombination and performance*. *Journal of Applied Physics*, 95, 1556–1563 (2004).
14. Istratov, A.A., Weber, E.R. *Physics of metal impurities in silicon*. *Journal of Applied Physics*, 97, 061101 (2005).
15. Seibt, M., et al. *Transition metal defects in silicon: Interaction, diffusion and gettering*. *Physica Status Solidi A*, 203(4), 696–713 (2006).
16. Simoen, E., et al. *Surface and near-surface effects of metal contamination in silicon*. *Applied Surface Science*, 255, 159–163 (2008).
17. Kwapil, W., et al. *Advanced defect characterization in silicon by combined electrical and microscopic techniques*. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4(3), 791–798 (2014).
18. Abdelbarey, D., et al. *Correlation between metal clustering and carrier lifetime in silicon*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 158, 68–75 (2016).

**KINEMATIK QO‘ZG‘ALISHLARDA STERJENI MATEMATIK MODELLASHTIRISH
VA DINAMIK XARAKTERISTIKALARINI ANIQLASH**

Dusmatov Olimjon Musurmonovich,

Samarqand davlat universiteti

Nazariy va injenerlik mexanikasi kafedrası professori,

fizika-matematika fanlari doktori

dusmatov62@bk.ru

Toshov Bo‘ri Rajabovich,

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti

Muhandislik mexanikasi kafedrası mudiri,

fizika-matematika fanlari nomzodi, professor

toshov_b@mail.ru

Kasimova Firuza Ulug‘bekovna,

Samarqand davlat universiteti

Nazariy va injenerlik mexanikasi kafedrası tayanch doktoranti

fkasimova.samdu@mail.ru.

Annotatsiya. Ushbu ishda garmonik kinematik qo‘zg‘alishlarga ko‘ndalang kesimi o‘zgaruvchan gisterezis tipidagi elastik dissipativ xarakteristikali sterjenning ko‘ndalang tebranishlarini matematik modellashtirish va dinamik xarakteristikalarini aniqlash masalasi qaralgan. Sterjen materialining dissipativlik xossalarini ifodalovchi nochizikli funktsiya garmonik chiziqilashtirish usuli yordamida chizikli kompleks funktsiya orqali tenglamada hisobga olingan. Ishda xususiy chastotalar va xususiy tebranishlar formalari aniqlangan. Sonli hisoblashlar asosida xulosalar keltirilgan.

Kalit so‘zlar: ko‘ndalang kesimi o‘zgaruvchan sterjen, dissipativ, gisterezis, amplituda, chastota, kinematik qo‘zg‘alish, tebranish, xususiy tebranish formalari.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СТЕРЖНЯ ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ**

Аннотация. В этой работе рассмотрена задача математического моделирования и определения динамических характеристик стержня переменного поперечного сечения с упругодиссипативными характеристиками гистерезисного типа при кинематических воздействиях. В уравнении нелинейная функция, характеризующая упругодиссипативную характеристику материала стержня, учитывается с помощью метода гармонической линеаризации в линейной комплексной форме. В работе определены собственные частоты и собственные формы колебаний. На основе численных расчётов приведены выводы.

Ключевые слова: стержень переменного поперечного сечения, диссипативный, гистерезис, амплитуда, частота, кинематическое возбуждение, формы собственных колебаний.

**MATHEMATICAL MODELING AND DETERMINATION OF DYNAMIC
CHARACTERISTICS OF A BEAM UNDER KINEMATIC EXCITATION**

Abstract. This paper examines the problem of mathematical modeling and determining the dynamic characteristics of a variable-cross-section beam with hysteresis-type elastic-dissipative characteristics under kinematic excitations. The equation describes a nonlinear function characterizing the elastic-dissipative function using the harmonic linearization method in linear complex form. The natural frequencies and mode shapes are determined. Conclusions are drawn based on numerical calculations.

Keywords: variable-cross-section beam, dissipative, hysteresis, amplitude, frequency, kinematic excitation, mode shapes.

Kirish. Mexanik sistemalarning elementlari materiallaridagi chiziqimas dissipativ xarakteristikalarini hisobga olgan holda ularning tebranishlarini tadqiq etish dolzarb masalalardan hisoblanadi.

[1] - ishda ko‘ndalang kesimi o‘zgaruvchan sterjenning bo‘ylama tebranishlari uchun harakat differensial tenglamasi va uning yechimlari aniqlangan. Bunda ko‘ndalang kesimi chizikli qonuniyat bilan

o'zgaruvchi sterjen uchun differensial tenglama tegishli almashtirishlar yordamida Lejandr tenglamasiga keltirilgan. Turli xil chegaraviy shartlar uchun sterjenning chastota tenglamalari topilgan. Olingan natijalar adabiyotlarda mavjud bo'lgan ko'ndalang kesimdagi o'zgarishlarning maxsus holatlari uchun o'rinli bo'lgan yechimlar bilan taqqoslangan. Bundan tashqari, sterjenning ko'ndalang kesimi yuzasi o'zgarishining tebranish xarakteriga ta'siri sonli tahlil qilingan.

[2] – ishda vertikal holatdagi o'zgaruvchan kesimli sterjenning og'irligini hisobga olgan holdagi kinematik va tasodifiy tebranishlari o'rganilgan. Tebranishlar amplitudalari va o'rtacha kvadratik qiymatlarining analitik ifodalari aniqlangan. Tasodifiy va garmonik tebranishlarga parametrlarning ta'siri baholangan. Rezonans chastotasi atrofida amplitudalari va o'rtacha kvadratik qiymatlarining o'zgarishi tahlil qilingan.

[3] - ish aylanuvchi diskka o'rnatilgan ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan sterjenning tebranishlarini o'rganishga bag'ishlangan. Sterjenga vaqtga bog'liq bo'lgan diskka parallel kuch tashqi kuch sifatida qo'yilgan. Ko'ndalang kesimining o'zgarish qonuniyati turli xil ko'rinishlarda olingan. Qattiq diskga o'rnatilgan aylanayotgan sterjenning harakat tenglamalari olingan. Koriolis kuchlari va markazdan qochma kuchlarni hisobga olib, uzatish effektlari matematik modelda ko'rib chiqilgan. Chiziqlimas sistemalar uchun bu masalalarni yechish zarurati mavjudligi haqida mulohazalar keltirilgan.

[4] – ishda bir uchidan boshlab qalinligi bir xilda kamayib boradigan sterjenning ko'ndalang tebranishlari ko'rib chiqilgan. Tebranishlar tezligi tahlil qilingan. Olingan differensial tenglamalar aniq yechimga ega ekanligi ko'rsatilgan. Bu yechimlar asosida qalinligi o'zgarishi parabolik bo'lmaganda sterjen tenglamasini yechish uchun yangi usul taklif etilgan.

[5] - maqolada o'zgaruvchan ko'ndalang kesimli sterjenlarning tebranishlarini tahlil qilishning sonli usullari keltirilgan. Ostrogradskiy - Gamilton printsipi sterjen - tenglamalarning bo'ylama, buralma va ko'ndalang tebranishlari tenglamalarini olish uchun ishlatilgan. Turli xil chegaraviy shartlarda differensial hisob usullari bilan berilgan chegaraviy masala yechilgan, tavsiyalar ishlab chiqilgan.

[6] – ishda ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan kompozit sterjenda kuchlanish-deformatsiya holatini hisoblashning umumiy yondashuvi ishlab chiqilgan. Ushbu sterjenlar dinamikasi turli xil materiallar va dinamik yuklash jarayonlari uchun sinovdan o'tkazilgan. Taklif etilayotgan hisoblash modelida deformatsiyalar va qovushqoq elastik o'zaro ta'siri hisobga olingan. Sterjenli sistemalarining elementlari bo'lgan bunday xil ko'ndalang kesimli sterjenlar yuqori mustahkamlik ko'rsatkichlari bilan ajralib turishi va shu bilan birga o'zgarish ko'ndalang kesimli sterjenlarga nisbatan ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirishi ko'rsatilgan.

[7] - ishda egri sterjenning chiziqli tebranishlari chekli elementlar usuli yordamida o'rganilgan. Egri sterjen yarim aylana ko'rinishida, sterjenning ko'ndalang kesimi esa doiraviy va to'rtburchak ko'rinishlarda olingan. Ko'ndalang kesim yuzalari bir xil tarzda nosimmetrik va simmetrik toraygan sterjenning tebranishlari ko'rib chiqilgan va xususiy chastotalar turli chegaraviy shartlar uchun aniqlangan. Cho'zilish va egilish effektlari tekshirilgan. Sterjenning ustiga qo'shimcha massa o'rnatilgan holdagi tebranishlari ham ko'rib chiqilgan va ko'ndalang kesimining o'zgarishining xususiy chastotalarga ta'siri tekshirilgan, xulosalar keltirilgan.

[8] - ishda sterjenlar qurilish sanoatida ko'priklar, yo'l o'tkazgichlar, qoplamalar, pollar, zinapoyalar va boshqalar uchun yuk ko'taruvchi konstruksiyalar sifatida keng qo'llanilishi qayd etilib, bunday konstruksiyalarning yuk ko'tarish qobiliyatidan to'liq foydalanish va material sarfini kamaytirish uchun uzunligi bo'ylab o'zgaruvchi kesimli sterjenlardan foydalanish maqsadga muvofiqligi ko'rsatilgan. Ishlash jarayonida bunday strukturaviy elementlarda har xil turdagi tebranishlar yuzaga kelishi tahlil qilingan, bu esa ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan sterjenlarning ko'ndalang tebranishlarini har tomonlama o'rganish dolzarb ekanligini ko'rsatgan.

[9] - maqolada temir yo'l uzelinig elementi bo'lgan ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan sterjenning ko'ndalang tebranishlarining dinamikasi o'rganilgan. Bundan tashqari ko'ndalang kesimi o'zgarish bo'lgan hol ham qaralgan. Ikkala hollarda ham sterjenga temir yo'l harakatlari ta'siridan kelib chiqadigan vertikal kuch ta'sir qiladi deb qaralgan. Bu maqolada, shuningdek, o'zgaruvchan inersiya va qattqlik momentlariga ega bo'lgan egri sterjenning xususiy tebranishlari tahlili keltirilgan. Yechim to'rtinchi tartibli xususiy hosilali differensial tenglamalarni oddiy differensial tenglamalar sifatida ifodalash uchun xizmat qilgan Rits usulini qo'llash orqali topilgan. Sonli tahlillar asosida sterjen parametrlari va vertikal yukdagi o'zgarishlar sterjenning xususiy tebranishlariga qanday ta'sir qilishi baholangan.

[10] - ishda bir uchidan elastik mahkamlangan o'zgaruvchan kesimli sterjenning ko'ndalang tebranishlarda xususiy chastotalarini hisoblash masalasi yechilgan. Beshinchi darajali algebraik polinomlar bilan olingan xususiy chastotalarning hisoblangan qiymatlarini ekstrapolyatsiya sonli usuli yordamida

aniqlash imkoniyati tahlil qilingan. Ekstrapolyatsiya sonli usuli hisoblashlarning aniqligini uch barobargacha oshirish imkonini berishi ko'rsatilgan.

[11] – ishda o'zgarmas balandlikga ega va eni eksponensial qonuniyat bo'yicha o'zgaruvchi sterjenning ko'ndalang tebranishlari ko'rib chiqilgan. Turli xil chegaraviy shartlarda chastota tenglamasi, xususiyl chastotalari aniqlangan. Olingan natijalar boshqa mualliflar tomonidan olingan natijalardan sezilarli darajada farq qilishi ko'rsatilgan.

Ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan gisterezis tipidagi elastik dissipativ xarakteristikali ya'ni nomukammal elastik sterjenning kinematik qo'zg'alishlardagi ko'ndalang tebranishlarini o'rganish dolzarb masalalardan hisoblanadi.

Sterjenning matematik modeli. Ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan gisterezis tipidagi elastik dissipativ xarakteristikali sterjenning kinematik qo'zg'alishlardagi ko'ndalang tebranishlarini matematik modellashtirish dinamik xarakteristikalarini tahlil qilish masalasini qaraymiz.

Sterjenning uzunligi l , eni $b(x)$ – o'zgaruvchan, qalinligi h bo'lib, qo'zg'aluvchi asosga o'rnatilgan bo'lsin.

Sterjenning kinematik qo'zg'alishlardagi ko'ndalang tebranishlari harakat differensial tenglamasini quyidagicha yozamiz:

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + m_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -m_0 W_0; \quad (1)$$

bunda M – eguvchi moment; w – sterjenning egilish funksiyasi; m_0 – sterjen uzunligining birlik massasi; W_0 – asosning tezlanishi.

Ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan sterjenning eguvchi momentini yozamiz:

$$M = 2b(x) \int_0^{\frac{h}{2}} \sigma z dz, \quad (2)$$

bunda σ – normal kuchlanish; z – sterjen neytral x - o'qiga perpendikulyar yo'nalgan o'q.

Sterjen balandligi o'zgarmas, eni o'zgaruvchan bo'lib, sterjen materiali nomukammal elastikligini ifodalovchi bir qiymatli bo'lmagan $\bar{\Phi}(\xi)$ funksiya garmonik kinematik qo'zg'alishlarda garmonik linearizatsiya usuli yordamida quyidagi chiziqli kompleks ifoda bilan almashtiriladi [12]:

$$\bar{\Phi}(\xi) \approx H(\xi) = (-q_{1*} + jq_{2*})\xi, \quad (3)$$

bunda q_{1*}, q_{2*} – chiziqilashtirish koeffitsientlari; ξ – nisbiy deformatsiya.

Garmonik jarayonlar uchun linearizatsiya koeffitsientlari quyidagicha bo'ladi:

$$q_{1*} = -\frac{1}{\pi a} \int_0^{2\pi} \varepsilon \bar{\Phi}(a \cos \varphi) \cos \varphi d\varphi;$$

$$q_{2*} = -\frac{1}{\pi a \omega} \int_0^{2\pi} \varepsilon \bar{\Phi}(a \cos \varphi) \sin \varphi d\varphi,$$

bunda ε - kichik parametr; ω – tebranishlar chastotasi; a, φ - lar mos ravishda $\xi(t)$ o'zgaruvchining amplitudasi va fazasi.

(3) ifodada $\xi(t)$ o'zgaruvchi quyidagicha olingan:

$$\xi(t) = a \cos \varphi. \quad (4)$$

Sterjen materialidagi kuchlanish va nisbiy deformatsiya orasidagi quyidagi munosabatdan foydalanamiz [12]:

$$\sigma = E(1 + (-\eta_1 + j\eta_2)[C_0 + f(\xi_0)])\xi_0, \quad (5)$$

bunda E – elastiklik moduli; $\eta_1, \eta_2 = \eta_{22} \text{sign}(\omega)$ lar sterjen materialining elastik dissipativlik xossalari bog'liq bo'lgan doimiy koeffitsientlar bo'lib, gisterezis sirtmog'idan aniqlanadi; $f(\xi_0)$ – tebranishlar dekrementi bo'lib, ξ_0 nisbiy deformatsiya absolyut qiymatining funksiyasi hisoblanadi,

$$f(\xi_0) = C_1 \xi_0 + C_2 \xi_0^2 \dots + C_n \xi_0^n, \quad (6)$$

C_0, C_1, \dots, C_n - gisterezis tugunining tajribadan aniqlanadigan parametrlari bo'lib, sterjen materialining dempferlovchi xossalari bog'liq [13].

ξ_0 nisbiy deformatsiya quyidagicha hisoblanadi:

$$\xi_o = \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} z, \quad (7)$$

Keltirilgan (5) ifodani (2) eguvchi moment ifodasiga qo'yamiz, natijada ega bo'lamiz

$$M = EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \left[1 + C_0(-\eta_1 + j\eta_2) + \frac{24}{h^3}(-\eta_1 + j\eta_2) \int_0^{\frac{h}{2}} f(\xi_{ot}) z^2 dz \right], \quad (8)$$

bunda $I = \frac{bh^3}{12}$; $b = b(x)$ va $h = const$.

U holda moment ifodasini e'tiborga olib (1) differensial tenglamani qo'yidagicha yozamiz:

$$\begin{aligned} EI(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \left[1 + C_0(-\eta_1 + j\eta_2) + \frac{24}{h^3}(-\eta_1 + j\eta_2) \int_0^{\frac{h}{2}} f(\xi_o) z^2 dz \right] \right\} + \\ + 2E \frac{\partial I(x)}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \left[1 + C_0(-\eta_1 + j\eta_2) + \frac{24}{h^3}(-\eta_1 + j\eta_2) \int_0^{\frac{h}{2}} f(\xi_o) z^2 dz \right] \right\} + \\ + E \frac{\partial^2 I(x)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \left[1 + C_0(-\eta_1 + j\eta_2) + \frac{24}{h^3}(-\eta_1 + j\eta_2) \int_0^{\frac{h}{2}} f(\xi_o) z^2 dz \right] + \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \\ = -\rho F \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Yechish metodikasi. (9) differensial tenglamaning yechimini qo'yidagicha izlaymiz:

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} u_i(x) q_i(t), \quad (10)$$

bunda $q_i(t)$ – vaqtning funksiyasi; $u_i(x)$ - sterjen tebranishlarining xususiy formalari.

(10) yechimni (9) differensial tenglamaga qo'yamiz va ba'zi almashtirishlardan keyin quyidagi differensial tenglamaga ega bo'lamiz:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i + \left\{ (1 + C_0(-\eta_1 + j\eta_2)) p_i^2 + \frac{3E}{\rho F d_{2i}} (-\eta_1 + j\eta_2) \times \right. \\ \times \sum_{k=1}^n C_k q_{ia}^k \frac{h^k}{2^k(k+3)} \int_0^l I(x) u_i \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \left| \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \right|^k \right) dx + \\ + \frac{E}{\rho F d_{2i}} \int_0^l \frac{\partial^2 I(x)}{\partial x^2} u_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \times \\ \times \left[1 + C_0(-\eta_1 + j\eta_2) + 3(-\eta_1 + j\eta_2) \sum_{k=1}^n C_k q_{ia}^k \frac{h^k}{2^k(k+3)} \left| \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \right|^k \right] dx + \\ + \frac{2E}{\rho F d_{2i}} \int_0^l \frac{\partial I(x)}{\partial x} u_i \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} [1 + C_0(-\eta_1 + j\eta_2) + 3(-\eta_1 + j\eta_2) \times \right. \\ \times \sum_{k=1}^n C_k q_{ia}^k \frac{h^k}{2^k(k+3)} \left| \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \right|^k] dx \left. \right\} q_i = -d_i \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2}; \end{aligned} \quad (11)$$

bunda $d_i = \frac{d_{1i}}{d_{2i}}$; $d_{1i} = \int_0^l u_i dx$; $d_{2i} = \int_0^l u_i^2 dx$.

(11) tenglamani yechish natijasida q_i o'zgaruvchini topamiz

$$q_i = -\frac{d_i}{N_a} W_0; \quad (12)$$

bunda

$$\begin{aligned}
 N_a = & S^2 + (1 + C_0(-\eta_1 + j\eta_2))p_i^2 + \frac{3E}{\rho F d_{2i}} (-\eta_1 + j\eta_2) \times \\
 & \times \sum_{k=1}^n C_k q_{ia}^k \frac{h^k}{2^k(k+3)} \int_0^l I(x) u_i \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \left| \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \right|^k \right) dx + \\
 & + \frac{E}{\rho F d_{2i}} \int_0^l \frac{\partial^2 I(x)}{\partial x^2} u_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \times \\
 & \times \left[1 + C_0(-\eta_1 + j\eta_2) + 3(-\eta_1 + j\eta_2) \sum_{k=1}^n C_k q_{ia}^k \frac{h^k}{2^k(k+3)} \left| \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \right|^k \right] dx + \\
 & + \frac{2E}{\rho F d_{2i}} \int_0^l \frac{\partial I(x)}{\partial x} u_i \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} [1 + C_0(-\eta_1 + j\eta_2) + 3(-\eta_1 + j\eta_2) \times \right. \\
 & \left. \times \sum_{k=1}^n C_k q_{ia}^k \frac{h^k}{2^k(k+3)} \left| \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \right|^k \right] dx;
 \end{aligned}$$

bu yerda $S = i\omega$.

Sonli hisoblashlar va tahlillar. Faraz qilaylik ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan sterjenning chap uchi qistirib mahkamlangan, o'ng uchi erkin bo'lsin. Bunda asos ko'chishi $w_0 = -\varepsilon a_0 \cos \omega t$ bo'lsin. U holda chegaraviy shartlar quyidagicha bo'ladi:

$x = 0$ bo'lgan sterjen uchi uchun:

$$w_i = w_0, \quad \frac{\partial w_i}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0. \quad (13)$$

$x = l$ bo'lgan sterjen uchi uchun:

$$\frac{\partial^2 w_i}{\partial x^2} \Big|_{x=l} = 0, \quad EI \frac{\partial^3 w_i}{\partial x^3} \Big|_{x=l} = 0. \quad (14)$$

Xususiy tebranish formasini quyidagicha olamiz:

$$u_i(x) = AK_1(k_i x) + BK_2(k_i x) + CK_3(k_i x) + DK_4(k_i x), \quad (15)$$

bunda A, B, C, D – chegaraviy shartlardan aniqlanuvchi koeffitsiyentlar;

$K_1(k_i x), K_2(k_i x), K_3(k_i x), K_4(k_i x)$ – Krilov funksiyalari, ya'ni

$$K_1(k_i x) = \frac{1}{2} (\cosh(k_i x) + \cos(k_i x));$$

$$K_2(k_i x) = \frac{1}{2} (\sinh(k_i x) + \sin(k_i x));$$

$$K_3(k_i x) = \frac{1}{2} (\cosh(k_i x) - \cos(k_i x));$$

$$K_4(k_i x) = \frac{1}{2} (\sinh(k_i x) - \sin(k_i x));$$

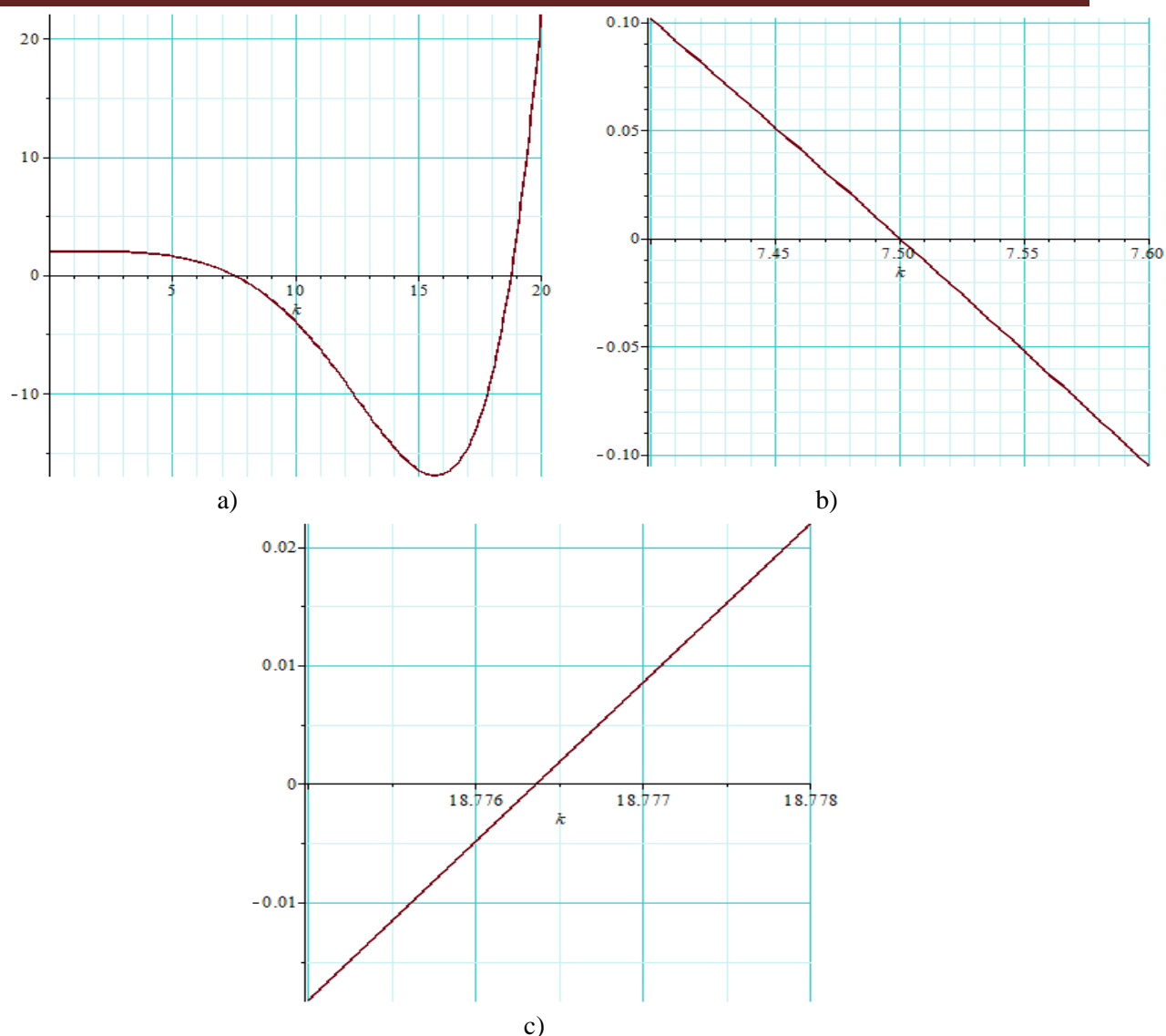
$$k_i \square = \left(\frac{\rho F}{EI} p_i^2 \right)^{\frac{1}{4}}.$$

(16)

Chegaraviy shartlarga xususiy tebranish formalarini qo'yamiz va koeffitsiyentlarni aniqlaymiz. Bu aniqlangan koeffitsiyentlarni xususiy tebranishlar formalariga qo'yamiz. Natijada chastota tenglamasi quyidagicha bo'ladi:

$$K_1^2(k_i l) - K_2(k_i l)K_4(k_i l) = 0. \quad (17)$$

$l = 0.25$ m bo'lganda (17) tenglamani grafik usulda yechamiz.



1-rasm. (17) Tenglamani aniqlovchi funksiyaning grafigi

1-rasmda (17) chastota tenglamasining grafigi (a) va uning birinchi (b) va ikkinchi (c) nollari keltirilgan. Bu grafiklardan $k_1 = 7.500416275$ va $k_2 = 18.77635$ ekanligini aniqlash mumkin. Aniqlangan bu qiymatlar asosida sterjenning xususiy chastotalarini aniqlaymiz.

Po'lat 40X markali materialni olamiz. Bunda

$$E = 2.08 \cdot 10^{11} \frac{N}{m^2}; \quad \rho = 7810 \frac{kg}{m^3}.$$

Sterjen eni qo'yidagi qonuniyat bilan o'zgaradi deb qaraymiz:

$$b = b_* + b_{*1} \sin(n_* x) = 0.02 + 0.01 \sin(80x) m;$$

$$h = 2 \cdot 10^{-3} m.$$

U holda parametrlar va o'zgaruvchining yuqorida keltirilgan qiymatlariga asosan birinchi va ikkinchi tebranish formalariga mos keladigan xususiy chastotalar quyidagicha bo'ladi:

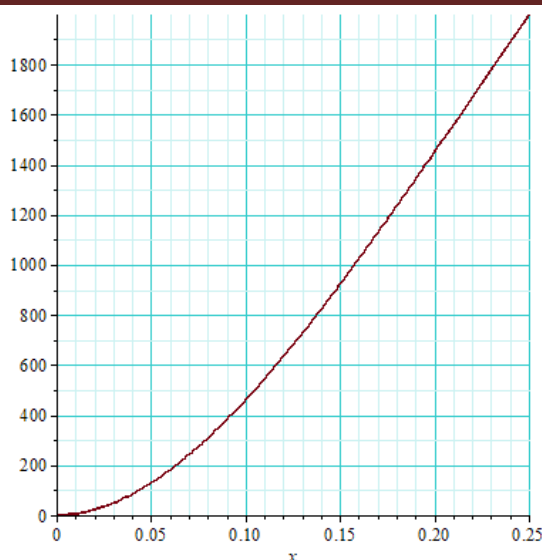
$$p_1^{\square} = 167.6163034 s^{-1}, \quad (18)$$

$$p_2^{\square} = 1050.431816 s^{-1}, \quad (19)$$

Birinchi va ikkinchi tebranish formalari quyidagicha bo'ladi:

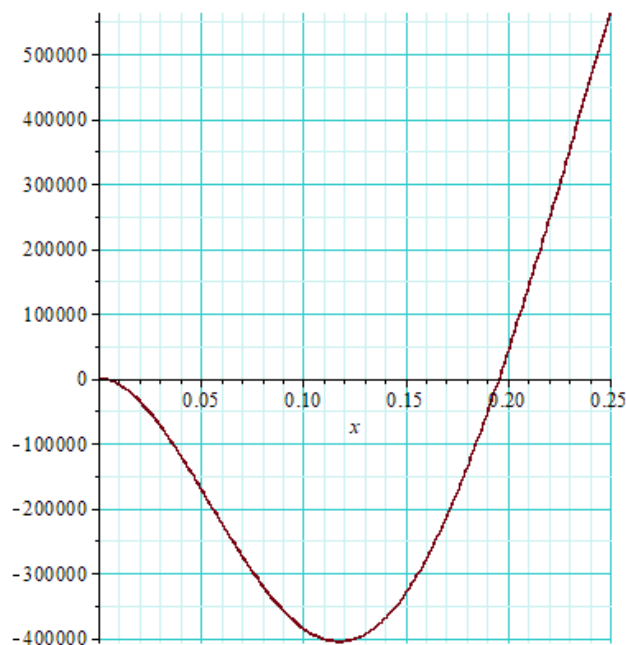
$$u_1(x) = 999.668759(\cosh(7.500416275x) - \cos(7.500416275x)) - 773.8523515(\sinh(7.500416275x) - \sin(7.500416275x)); \quad (20)$$

$$u_2(x) = -2.81762557 \cdot 10^5(\cosh(18.7764x) - \cos(18.7764x)) + 2.869669872 \cdot 10^5(\sinh(18.7764x) - \sin(18.7764x)); \quad (21)$$



2-rasm. (20) Xususiy tebranish formasining grafigi

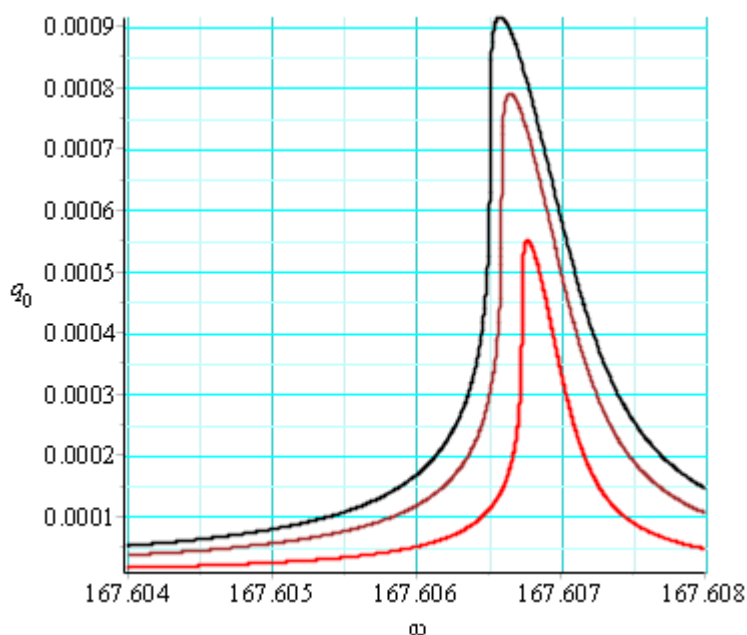
2-rasmda (20) xususiy tebranish formasining grafigi tasvirlangan. Bu grafikdan shuni ko'rishimiz mumkinki, chap uchi qistirib mahkamlangan va o'ng uchi erkin bo'lgan hamda o'ng uchiga dinamik so'ndirgich o'rnatilgan sterjenning chap uchidan boshlab o'ngga qarab siljigan nuqtalarining ko'chishlari sterjen uzunligi bo'yicha proporsional ravishda ko'chmaydi. Ya'ni, $u_1(0.05) = 127.6995493$, $u_1(0.1) = 459.6164556$, $u_1(0.15) = 921.9636139$, $u_1(0.2) = 1450.474769$ va $u_1(0.25) = 1999.337518$. Bu aniqlangan qiymatlar sterjenning har bir nuqtasining ko'chishini baholash imkonini beradi.



3-rasm. (21) Xususiy tebranish formasining grafigi

3-rasmda (21) xususiy tebranish formasining grafigi tasvirlangan. Bu grafikdan shuni ko'rishimiz mumkinki, tebranishning ikkinchi formasida birinchi formasidagi kabi chap uchi qistirib mahkamlangan va o'ng uchi erkin bo'lgan hamda o'ng uchiga dinamik so'ndirgich o'rnatilgan sterjenning chap uchidan boshlab o'ngga qarab siljigan nuqtalarining ko'chishlari sterjen uzunligi bo'yicha proporsional ravishda

ko'chmaydi. Ya'ni, $u_2(0.05) = -1.696515604 \cdot 10^5$, $u_2(0.1) = -3.851497135 \cdot 10^5$,
 $u_2(0.15) = -3.321767654 \cdot 10^5$, $u_2(0.2) = 39488.0953$ va $u_2(0.25) = 5.635804196 \cdot 10^5$.



4-rasm. (12) differensial tenglama bilan aniqlanadigan sterjenning amplituda chastota xarakteristikasi

(12) ifoda bilan aniqlanadigan amplituda chastota xarakteristikalarining grafiklari $c = 10^3 \frac{N}{m}$ va asos qo'zg'alishining amplitudaviy qiymatlari 0.00001; 0.000015; 0.0001 m (qizil; jigar rang; qora) bo'lgan hollar uchun tasvirlangan. Asos qo'zg'alishining bu amplitudaviy qiymatlariga mos keladigan rezonans chastotasi atrofidagi eng katta amplitudalar mos ravishda $q_0 = 0.55 \cdot 10^{-3}; 0.78 \cdot 10^{-3}; 0.92 \cdot 10^{-3} m$ qiymatlarni oladi. Ulardan shuni aytish mumkinki, asos qo'zg'alishi amplitudaviy qiymatlarining 10 marta oshishi rezonans chastotasi atrofidagi amplitudalarni 67.3 foizga oshishiga olib keladi.

Xulosa. Gisterezis tipidagi elastik dissipativ xarakteristikali, ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan sterjen ko'ndalang tebranishlarining kinematik qo'zg'alishlarda matematik modeli olingan. Sterjen tenglamasining yechimi aniqlangan. Sonli hisoblashlar natijasida ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan sterjenni dinamik xarakteristikalari aniqlanib tahlil qilingan.

ADABIYOTLAR:

1. Yardimoglu B., Aydin L. *Exact longitudinal vibration characteristics of rods with variable cross-sections Shock and Vibration*. 18 (2011), 555–562, 555, DOI 10.3233/SAV-2010-0561 IOS Press.
2. Alokova M., Kulterbaev Kh. *Flexural vibrations of the vertical rod variable section with a concentrated mass Journal of Dagestan State Technical University. Technical science*. No. 4 (39), 2015.
3. Zolkiewski S. *Vibrations of beams with a variable cross-section fixed on rotational rigid disks Latin American Journal of Solids and Structures* 10 (2013). pp 39 – 57.
4. Миронов М. А. Точные решения уравнения поперечных колебаний стержня со специальным законом изменения поперечного сечения. *Акустический журнал*, 2017, том 63 № 1, с. 3 -8.
5. Zhakash A.T., Dzhakashova E.A., Tursynbay O.M. *Numerical methods for calculating vibrations of straight rods of variable cross-section International Scientific Journal Theoretical & Applied Science* 09.07.2019, <http://T-Science.org>.
6. Nemirovsky Y.V., Mishchenko A.V., Terletskii R.F. *Dynamic analysis of composite rods with variable cross-section Computational Continuum Mechanics@journal-icmm*. 2 v.8, 2015. *Journal of Mathematical Sciences*, Vol. 223, No. 1, May, 2017.
7. Alper H.O., Mustafa I. *In-Plane vibrations of curved beams with variable cross-sections carrying additional mass 11th International Conference on Vibration Problems Z. Dimitrovová et al. (eds.) Lisbon, Portugal, 9-12, September, 2013.*

8. Baragunova L. A., Shogenova M. M., Shogenov O. M., Yafaunov E. A. Free vibrations of variable section beams taking rotational and frictional forces into account *Bulletin of Science and Research Center of Construction* [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-7-20](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-7-20).

9. Kisilowski J., Kowalik R. *Numerical Testing of Switch Point Dynamics-A Curved Beam with a Variable Cross-Section Materials (Basel) 2020, 4, Feb;13(3):701. doi: 10.3390/ma13030701.*

10. Pavlov V.P., Nusratullina L.R., Nusratullin E.M. Refining the results of numerical calculations of the frequencies of transverse vibrations of a rod of variable cross-section with elastic fixation by extrapolation method *UGATU Bulletin 2023, Vol. 27, No. 3 (101). 29–37 <http://journal.ugatu.su>*

11. Павлов В.П. Поперечные колебания стержня с переменным поперечным сечением и вычисление его собственных частот методом сплайнов. *Машиностроение и машиноведение. Вестник УГАТУ, 2017, Т. 21, № 2 (76). - с. 3–16.*

12. Павловский М.А., Рыжков Л.М., Яковенко В.Б., Дусматов О.М. *Нелинейные задачи динамики виброзащитных систем. – Киев: Техника, 1997. 204 с.*

13. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. *Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Справочник. - Киев: Наук.думка, 1971. – 327 с.*

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ПАСТБИЩ БУХАРСКОЙ ОБЛАСТИ

Хасанов Икром Хасанович,
старший научный сотрудник Бухарского
научно-производственного центра
семеноводства пастбищных культур
Министерства сельского хозяйства Узбекистана,
кандидат сельскохозяйственных наук
Остонова Насиба Хикматовна,
старший научный сотрудник Бухарского
научно-производственного центра семеноводства
пастбищных культур Министерства сельского
хозяйства Узбекистана, магистрант
Бухарского государственного университета

Аннотация. Опрыскивания многолетних пастбищных растений верблюжьей колючки и солодки голой в фазе цветения растений в Бухарской области повышают урожайность сена, сухой вес растений, кормовые достоинства и уровень рентабельности удобрений в каракулеводческих хозяйствах. Пастбищный оборот восстанавливает состояние растительности и повышает продуктивность животных и доходность хозяйств.

Ключевые слова: растение, биологические системы, продуктивность, плодovitость, питательность.

WAYS TO INCREASE THE PRODUCTIVITY OF PASTELANDS IN THE BUKHARA REGION

Abstract. Spraying perennial pasture plants such as camel thorn and licorice root during their flowering phase in the Bukhara region increases hay yield, plant dry weight, feed quality, and fertilizer profitability in karakul sheep farms. Pasture rotation restores vegetation conditions and enhances both livestock productivity and farm profitability.

Keywords: plant, biological systems, productivity, fertility, nutrition.

BUXORO VILOYATIDAGI YAYLOVLARNING HOSILDORLIGINI OSHIRISH YO‘LLARI

Annotatsiya. Buxoro viloyatida o‘simliklarning gullash davrida tuya tikan va yalang‘och qizilmiya o‘simligining ko‘p yillik yaylov o‘simliklarini sepish qorako‘lchilik xo‘jaliklarida pichan hosildorligini, o‘simliklarning quruq vaznini, ozuqa qiymatini va o‘g‘itlarning rentabellik darajasini oshiradi. Yaylov almashlab ekish o‘simliklarni tiklaydi, hayvonlarning mahsuldorligini va fermer xo‘jaliklarining rentabelligini oshiradi.

Kalit so‘zlar: o‘simlik, biologik sistemalar, hosildorlik, unuvchanlik, ozuqaviylik.

Введение. В Центральной Азии 90 % территории занимают пустыни, 15 % - горы, 750 тысяч га - богарные земли и 4 % - орошаемые пашни. Основным водным источником являются Амударья, Сырдарья, Норын, Зарафшан, а также вертикальные, коллекторы и дренажи за счёт грунтовых вод.

Аральское море занимает площадь 5,5 млн. га (12,5 %) земель республики. Сейчас осталось 13,7 5 площади с солёной (35 г/л) водой, а 87,3 % площади высохло из-за нехватки воды. С высохшей площади ежегодно с помощью ветра поднимается 75 млн. тонн водорастворимых солей, которые распространяются на огромные площади земного шара.

По решению партии и правительства республики Узбекистан до настоящего времени посеяно и посажено пастбищных растений на дне борозды на глубину 30-40 см на общей площади 2,2 млн. га (24 %) высохших площадей. Борозды проведены на расстоянии через 10 м. После ликвидации колхозов и совхозов области в 2006 году, каждому каракулеводческому хозяйству выделено по 300 гектаров орошаемой пашни для выращивания люцерны и других кормовых культур. На этих землях, вдоль оросительных систем и других неиспользуемых земель, корневища солодки голой можно семенами и корневыми черенками длиной 10-12 см посадить на глубину 10-15 см. Плантации янтака

и солодки голой можно проводить осенью полосой 8-10 м столько же глубиной. Через 3-4 года корнями полностью покрываются растений всех площадей с многолетними растениями. Янтак, солодка, юлгуна, изенья, шуваваха широко применяют опрыскивание в фазе цветения растений карбамидными суспензиями из расчёта 50-60 кг/га на 300 л/га воды и опрыскивают до появления солнца.

Анализ полученных результатов. Имеющиеся пастбища хозяйства необходимо разделить на 5-6 участков для нормального условия развития других кормовых пастбищных растений. Внесение азотных удобрений и пастбищные обороты на пастбищных области повышают продуктивность каракульских овец. При опрыскивании растений карбамидом используют 80 % азота, а при внесении в почву этот показатель не превышает 40-50 % (Д.А.Кореньков).

Таблица 1.

Эффективность карбамидной суспензии на продуктивность растений верблюжьей колючки и солодки голой в Бухарской области. (Среднее значение за 3 года).

Варианты	Густота стояния	Сухой вес 1-20 растения		Кормовые единицы		Урожайность сена по укосам						Общий урожай		Уровень рентабельности, %
	Тысяч га	2	%	К.ед	%	1-ый ц/га	%	2-ой ц/га	%	3-ый ц/га	%	ц/га	%	
Контроль (без удобрений)	240,0	44,7	100	0,28	100	39,4	74	13,6	26			53,6	100	
Карбами д 50 кг/га		50,9	114	0,28	111	46,5	85	13,2	15			66,8	125	30,1
Контроль (без удобрений)	650,0	58,8	100	0,42	100	80,056	56	32,0	22	30,6	22	142,6	100	
Карбами д 50 кг/га	11	65,3	128	0,42	107	113,0	63	32,0	18	33,7	19	178,7	125	35,2

Густота стояний растений солодки голой возросла в 2,7 раза высота роста - на 15 %, сухой вес растений и урожайность сена - на 17 %, кормовые достоинства - на 0,14 % (29%), обменная энергия - (40 %) и рентабельность минеральных удобрений - до 35 %. Солодка голая, произрастающая в естественных условиях, имеет большую густоту стояния растений или в 2,5-3 раза, сухой вес растений увеличился в 2 раза, кормовые единицы - на 0,14 (29%) больше, чем верблюжьей колючки. Кроме того, до наступления заморозков можно проводить 3-ий укос, урожайность которого составляет более 30 ц/га. (таблица 2)

Опрыскивание карбамидной суспензии на растениях верблюжьей колючки и солодки голой в среднем за 3 года повысило урожайность сена янтака на 3,9 раза и солодки голой - в 2,7 раза по сравнению с контролем.

Разрастание растений вдоль оросительного канала на территории Бухарской опытной станции научно-исследовательского института селекции, семеноводства и агротехнологии возделывания хлопчатника, без поливов обеспечило получение высокой урожайности вегетативной массы.

Фенологические наблюдения за ростом и развитием растений проводились на 50 заэтикетированных растениях.

Площадь делянки 400 км (длина 10 м, ширина 40 м). Урожайность сырой массы взвешивалась на электронных весах и переведена на сухую массу по соотношению 3:1, математическая обработка проводилась по методу Б.А.Доспехова.

Таблица 2.

Влияние карбамидной суспензии на вес и всхожесть семян верблюжьей колючки и солодки голой

Варианты	Вес 100 семян, г				Всхожесть, %			
	2020	2021	Среднее	%	2020	2021	Среднее	%
Верблюжья колючка								
Контроль (без удобрений)	12,2	15,0	13,6	100	32,6	30,2	31,1	100
Карбамид 50 кг/га	14,5	17,0	15,7	115	72,5	68,9	70,7	229
Солодка голая								
Контроль (без удобрений)	23,8	24,0	23,9	100	30,8	31,4	31,1	100
Карбамид 50 кг/га	28,5	29,6	29,2	122	82,6	84,8	83,7	269

Применение карбамидной суспензии на растениях верблюжьей колючки и солодки голой в фазе цветения повышает вес семян соответственно 2,1=(15%), 5,3=(22%) и всхожесть - в 1,9 и 2,7 раза.

Таблица 3.

Площади посевов пастбищных культур по Республике Узбекистан в (2018-2024 гг).

Области	Районы	Площади семенных культур, га
Каракалпакская Республика	Тахтакупирский	2000
Бухара	Алатский,	150
	Гиждуванский,	1300
	Жондорский, Караулбазарский,	400
	Шафирканский	1150
		1500
Джиззах	Фаришский	300
Навайский	Канимехский	2000
	Кызылтепинский	2500
Кашкадарьинский	Нишанский,	500
	Муборакский,	500
	Гузарский,	500
	Миришкарский	1000
Самаркандский	Нурабадский,	500
	Пахтачийский	500
Сурхандарьинский	Кумкурганский	200
Итого:		15000

По республике на пастбищных зонах, на посеянных культурах заготавливаются посевные семена до 2025 года 15 тысяч гектаров. В Республике Каракалпакстан Тахтакупирский район 2000 га (донашур, кунгирбаш, черкез, изен), в Бухарской и Навоийской областях - по 4,5 тысяч гектаров (чогон, саксаул, олабута, коврак, черкез, баликкуз, янтак), в Джиззакской области (кейреук, чогон, саксаул, янтак, баликкуз), в Самаркандской - 1000 га (саксаул, изен, шувак, янтак, олабута), в Кашкадарьинской области - 2500 га (кандим, чогон, черкез) и в Сурхандарьинской области 200 га (черкез, чогон, терескен). В 2019-2024 году по центру наибольшую площадь семеноводческих

посевов занимают черкез - 3706 га, саксаул - 3631 га, чогон - 162 га, терескен - 99 га. Всего заготавливаются ежегодно семена пастбищных культур по 30-60 тонн.

Уход, охрана и заготовка семян площадей осуществляются работниками центра.

Таблица 4.

**Влияние биостимуляторов на всхожесть семян и накопление биомассы
(среднее значение за 2 года)**

Биостимуляторы	Янтак, %			Солодка голая, %		
	всхожесть	биомасса,г	%	всхожесть	биомасса,г	%
Контроль (без замочки)	31,4	3,4	100	44,9	43,1	100
Калий фосфат	69,0	4,8	140	48,3	73,0	167
Аминомакс	77,3	4,9	144	57,6	98,9	229
Геогумат	87,0	5,7	167	61,9	118,3	274

Закключение. Семена пастбищных культур имеют низкую всхожесть семян, порядка 10-60 процентов, распространяются в основном с помощью ветра и корневищами. Применение биостимуляторов на замочке семян повышает всхожесть семян янтака в 2,8 раза и солодки голой - в 1,4 раза. Накопление биомассы в 1,7-2,7 раза выше по сравнению с контролем (таблица 4).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Атабаева Х., Тажетдинов Н. Влияние стимуляторов на всхожесть семян солодки. // Ж. «Агроилм», №3, 2019 с-3А-38.
2. Кореньков Д.А. Справочник агрохимика Москва, 1980, с.325.
3. Шамсиддинов З.Ш. Создание долголетних пастбищ в аридной зоне Средней Азии. Ташкент, с 1975 с 1975.
4. Хасанов И.Х. Эффективность применения карбамидной суспензии на верблюжьей колючке и солодке голой в Узбекистане. // Ж. «Актуальные проблемы современной науки», №6, 2022, с 77-82.

**SUG'ORILADIGAN TUPROQLARNING XOSSA XUSUSIYATLARI VA TADQIQI
(Buxoro tumani misolida)**

*Artikova Hafiza To'ymurodovna,
Buxoro davlat pedagogika instituti professori, b.f.d.
Shadiyeva Sayyora Sadulloyevna,
"TIQXMMI" MTU Buxoro tabiiy resurslarni
boshqarish instituti tadqiqotchisi*

***Annotatsiya.** Respublikamizning 4304,32 ming gektar sug'oriladigan yerlarning asosiy qismi (50%ga yaqin) turli darajada sho'rlangan tuproqlarni tashkil etib, bu holat sug'oriladigan hududlarda qishloq xo'jaligi ekinlarining umumiy hosildorligini pasaytiradi. Ushbu maqolada Buxoro tumani sug'oriladigan tuproqlari va ularning agrofizikaviy xossalari to'g'risida batafsil ma'lumotlar keltirilgan. Bundan tashqari tuproq unumdorligini yaxshilash chora-tadbirlari keltirilib o'tilgan.*

***Kalit so'zlar:** Buxoro tumani, sug'oriladigan tuproqlar, tuproqlarni mexanik tarkibi, Zarafshon daryosi deltasi, melioratsiya, tuproq unumdorligi, sug'orish me'yorlari, sho'rланish, ona jins, prolyuvial, allyuvial, lyossimon qumoglar, grunt suvlari, mineralizatsiya.*

**СПЕЦИФИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОРОШАЕМЫХ ПОЧВ
(на примере Бухарского района)**

***Аннотация.** Основная часть из 4304,32 тыс. га орошаемых земель нашей республики (около 50%) состоит из почв различной степени засоления, что снижает общую продуктивность сельскохозяйственных культур на орошаемых территориях. В данной статье представлена подробная информация об орошаемых почвах Бухарской области и их агрофизических свойствах. Кроме того, были представлены мероприятия по повышению плодородия почв.*

***Ключевые слова:** Бухарский район, орошаемые почвы, механический состав почв, дельта реки Зерафшан, мелиорация, плодородие почв, нормы орошения, засоленность, материнская порода, пролювиальные, аллювиальные, лессовые пески, подземные воды, минерализация.*

**SPECIFIC PROPERTIES AND RESEARCH OF IRRIGATED SOILS
(on the example of Bukhara district)**

***Abstract.** The main part of 4304.32 thousand hectares of irrigated land of our republic (about 50%) consists of soils with varying degrees of salinity, which reduces the overall productivity of agricultural crops in irrigated areas. This article provides detailed information about the irrigated soils of Bukhara district and their agrophysical properties. In addition, measures to improve soil fertility were presented.*

***Key words:** Bukhara district, irrigated soils, soil mechanical composition, Zarafshan river delta, reclamation, soil fertility, irrigation standards, salinity, parent rock, proluvial, alluvial, loess sands, groundwater, mineralization*

Kirish. Buxoro viloyati Zarafshon daryosining quyi oqimida joylashgan bo'lib. Butun voha bo'yicha keng va qisqa daryo yotqizqlarida hosil bo'lgan maydonlardan iborat. Daryoning keng qismida Buxoro quyi qismida esa Qorako'l vohalari joylashgan. [3.4.]

Buxoro vohasi Navoyi – Konimex Xazaraning turtib chiqqan Avtobacha va Qiziltepa plotasining uchlamchi yotqizqlariga kirib boradi.

Bu vohaning uzunligi 80 km, maksimal kengligi 50 kmni tashkil etadi. Sharqda Xazaraning turtib chiqqan, janubiy g'arbda Jangara bo'yini, shimolda Qizilqum va Avtobacha plotasi janubda va janubiy g'arbda Kuyukmozor, Qiziltepa va Devxona plotasi bilan chegaralanadi.

Qorako'l vohasi kattaligi jihatidan birmuncha kichik va yoshi jihatidan yosh Zarafshon daryosining quyida Jangara bo'yinini Qorako'l plotasiga kirib borish joyida rivojlangan. Voha shimoliy – sharqdan Qorako'l plotasi, Jangara bo'yini bilan shimoldan Qizilqum qumlari va Qorako'l platosi, janubiy - g'arbdan Zarafshon vohasini Amudaryoning o'rta oqimidan ajratib turuvchi Sundukli qumlari bilan chegaralanadi.

Buxoro viloyati qishloq xo'jaligini tabiiy rayonlashtirilishi bo'yicha O'rta Osiyo cho'l provinsiyasi janubiy Qizilqum va shimoliy Qizilqum okruglarining subtropik cho'l hududiga kiradi.

Janubiy Qizilqum okrugida sug'oriladigan tekis hudud joylashgan bo'lib Zarafshon daryosining havza va havza oldi hamda Buxoro va Qorako'l daryolarining qadimgi chiqish irmog'i tekisligini o'z ichiga oladi. Obyekt sifatida hududning qolgan qismini Qizilqum cho'li ishg'ol qiladi. Cho'l mintaqasi Buxoro va Qorako'l irmoqlarida asosan eskidan sug'oriladigan allyuvial o'tloqi, o'tloqi cho'l va o'tloqi taqir tuproqlar tarqalgan. Viloyatda keng tarqalgan o'rta va yengil qumoqli mexanik tarkibli va sug'orish bilan band bo'lgan eskidan sug'oriladigan o'tloqi tuproqlar qishloq xo'jaligi asosiy ekinlari uchun maqbul agrofizik tartibotlarni (suv, oziqa va havo almashinishi va hakoza) vujudga keltirsa, Buxoro viloyatida keng tarqalgan taqirsimon, taqirsimon o'tloqi va sur tusli qung'ir tuproqlarda aksincha qiyin meliorativ holatlarni vujudga keltiradi. Chunki bu tuproqlar uchun xos bo'lgan xususiyatlarning u yoki bu darajada sho'rlanganligi va gipslashganligidir. Ma'lumki sho'r yuvish jarayoni og'ir mexanik tarkibli ayniqsa gipslashgan tuproqlarda juda sekin ketadi. [11.12]

Sug'oriladigan dehqonchilik mintaqasida ekologik-meliorativ vaziyat yomonlashishining sababi mavjud suv-yer zahiralardan ekstensiv tartibda foydalanishning oqibatidir. Yangi yerlarni o'zlashtirishga oid loyihalarning barchasida kollektor-zovur tarmoqlari suvlarini pastliklar va daryo o'zanlariga tashlash rejalashtirilgan edi.

Nazariy va amaliy asoslanmagan loyihalarni keng miqyosda amalga oshirish natijasida daryo suvlari sifati keskin yomonlashadi, o'zlashtirilgan maydonlar atrofida sun'iy ko'llar, botqoqliklar vujudga keladi, tabiiy muvozanat buziladi, ekologik holat yomonlashadi.

Sho'rlanishning eng salbiy tomoni u tuproq strukturasi buzadi, suv-fizikaviy, fizik-kimyoviy xossalarni yomonlashtiradi, tuproqlarning mikrobiologik faolligi va boshqa hossalari ta'sir ko'rsatib, tuproq degradatsiyasini keltirib chiqaradi.

Sho'rlangan va ikkilamchi sho'rlanishni oldini olish va melioratsiya muammolarini muvaffaqiyatli hal etishda xaydalma yerlarda "Sho'rlangan tuproqlarni xaritaga tushirish" ishlarini amalga oshirish zarur.

Buning uchun hududlarni tekshirish, tuproq qoplamini hamda tuproq gruntlarini sho'rlanish darajasini, sho'rlanish tiplarini sinchiklab o'rganish talab qilinadi.

Tadqiqot obyekti va uslubi. Buxoro tumani iqlim sharoitlariga ko'ra, yarim cho'l zonasi kontinental subtropik iqlim guruhiga kiradi. Tuman iqlim keskin kontinentaligi va nihoyatda quruqligi bilan ajralib turadi. Bu hudud uchun tropik va mo'tadil havo massasining fasllar bo'yicha almashlab turishi, yilning issiq paytlarida trasperatsiya jarayonlarining jadallashishi, sovuq davrlarda esa qutb fronti Osiyo oqimining kuchayishi xarakterlidir. Shuning uchun Buxoro tumanida yoz oylarida barqaror quruq va jazirama, qishda esa o'ta beqaror sovuq ob-havo hukm suradi.

Buxoro tumanining sug'oriladigan yerlari asosan to'rtlamchi davr yotqiziqlari-lyoss, allyuvial va prolyuvial jinslarda rivojlangan.

Bu to'rtlamchi qatlamning qalinligi 17-20 m ba'zida esa 30 m ni tashkil etadi. Bu yotqiziqlar tarkibi shag'al, qum, qumoq va agroirrigatsion qatlamlardan tuzilgan bo'lib, ular har qatlamda va turli chuqurliklarda uchraydi.

Zarafshon daryosi deltasi yuqori qismida to'rtlamchi jinslarida tosh, shag'al va qumlar uchrasa, o'rta va quyi oqimida esa qum, so'ngra qumoq, soz va goh-goh loylar tarqalgan.

To'rtlamchi allyuvial yotqiziqlar ustida agroirrigatsion qatlamlar (1-3m) rivojlangan bo'lib, ular inson faoliyati ta'sirida hosil bo'lgan.

Buxoro tumani sug'oriladigan yerlari shu jumladan F. Aloe, O. Ubaydov eramizdan oldingi V-VI-asrlarda 14-20 m chuqurlikda joylashgan to'rtlamchi allyuvial yotqiziqlar ustida rivojlangan. Hozirgi kunlarda bu allyuvial yotqiziqlarning yuqori qismi zamonaviy, madaniy antropogen agroirrigatsion qatlamlar bilan qoplangan. Sizot suvlarning sathi va minerallasuv darajasi shu mahalliy hamda allyuvial jinslarda tarqalgan bo'lib, turli mikro va mezorelef ta'sirida davrma-davr har-xil sho'rlanish jarayonlarining hosil bo'lishiga olib keladi.[2.]

Buxoro tumanlaridan olingan tuproq namunalarini laboratoriya sharoitida kimyoviy analiz qilinib, tuzlarning miqdori aniqlandi va ulardagi suvli so'rimning I va II metodi (Lebedev) bo'yicha sho'rlanish tipi va darajasi aniqlandi.

Dala izlanish va laboratoriya tahlillari natijasida tuzlarning miqdoriy ko'rsatkichlari, sho'rlanganlik darajasi va sho'rlanish tiplari tumanning turli maydonlarida turlicha ekanligi aniqlandi.

Sho'rlangan tuproqlarni qayd qilish, hisobga olish va xaritogramma tuzishning birinchi manbalari bo'lib, suvli so'rim analizlariga asoslangan xaritalashtirish materiallari hamda tuproq sho'rlanishi darajasini aniqlashning boshqa zamonaviy tezkor usullari (elektrokonduktrometrik usul) ma'lumotlari xizmat qiladi.

Tadqiqot natijalari. Sho'r yuvishda tuproqlarning sho'rlanish darajasi, mexanik tarkibi, suv o'tkazuvchanligi (suv-fizikaviy xossalari) hamda ildiz tarqaladigan qatlamdagi (0-1m) tuzlar miqdori va zahiralari hisobga olinishi zarur. Sho'r yuvish uchun suv me'yorlari mexanik tarkibiga qarab turlicha

BIOLOGY

sarflanadi. Tuproq gruntlari mexanik tarkibiga ko'ra yengil qatlamli tuproqlarda o'rtacha 3000-3500 m³/ga, o'rtacha sho'rlangan yerlarda 2-3 marta suv bostirish orqali 3500-5000 m³/ga, kuchli sho'rlangan yerlarda 3 marta suv bostirish orqali 4000-5000 m³/ga va juda kuchli sho'rlangan turli mexanik tarkibdagi tuproqlarda marzalar (cheklar)ga 3-4 marta suv bostirish orqali 5000-6500 m³/ga hamda kuchli va juda kuchli sho'rlangan og'ir mexanik tarkibli tuproqlarda 3-4 marta suv bostirish orqali 6000-7500 m³/ga me'yorlarida sho'ri yuviladi. Sho'r yuvishdan keyingi tuproqdagi tuzlar muqdiri xlor-ioni 0,01 % gacha va quruq qoldiq miqdorini esa 0,4-0,6 % gacha kamaytirish talab etiladi. Sho'r yuvish me'yorlarini belgilashda O'zPITI (hozirgi PSUEMTI) (paxta seleksiyasi urug'chiligi va yetishtirish agrotexnologiyasi ilmiy tadqiqot instituti) ning tavsiyalaridan (1-jadval) va mavjud ma'lumotlardan (sho'rlanish kartogrammalari asosida A.E.Nerozin formulasi bo'yicha) foydalaniladi.[2]

Sug'oriladigan sho'r yerlarda joriy sho'r yuvish me'yorlari va muddatlari

1- jadval.

Tuproqning mexanik tarkibi va tuzilishi	0-100 sm qatlamdagi xlor miqdori, %	Umumiy sho'r yuvish me'yorlari, m ³ /ga	Sho'r yuvish soni	Sho'r yuvish muddati (oylar)
Buxoro tumani				
Tuproq gruntlar mexanik tarkibiga ko'ra yengil qatlamli	0,01-0,04	2000-2500	1	III
	0,04-0,10	2500-4000	2	III
Tuproq gruntlar o'rta qumoqli, qatlamli mexanik tarkibiga ko'ra har xil	0,01-0,04	3000-3500	1	XII-II
	0,04-0,10	3500-5000	2	XII-II
Tuproq gruntlar loyli va og'ir qumoqli, bir xil jinsli va qatlamli	0,01-0,04	4000-5000	2	X-I
	0,04-0,10	5000-6500	3	X-I

Buxoro tumanining gidrogeologik sharoitlari o'ta murakkab bo'lib, yer osti suvlarining asosiy manbalari, sug'orish tarmoqlari va sug'oriladigan dalalardan shimilib ketayotgan suvlar, shuningdek, Zarafshon daryosidan oqib tushayotgan yer osti suvlari hisoblanadi va ular sizot suvlari balansida asosiy o'rinni egallaydi.

Sizot suvlari 1-2 m dan 2-3 m chuqurlikda aniqlangan. Pastqamliklarda grunt suvlari 1-2 m dan, hatto 0,5-1 m chuqurlikdan aniqlangan, bu yerlarda o'tloqi va botqoq-o'tloqi tuproqlar shakllangan.

Tabiiy va sun'iy zovurlashgan tuman sharoitida ko'p yillar davomida yuqori me'yorlarda sug'orish natijasida katta miqdorda shimilib ketayotgan suvlar yer osti sizot suvlari bilan qo'shilishib, ularning yer yuzasiga keskin ko'tarilishiga imkon yaratmoqda, bu jarayon o'z navbatida tuproqlarda jadal tuz to'planishiga, sug'oriladigan yerlarning meliorativ holatining yomonlashuviga olib kelmoqda. Sizot suvlar holati mavsumiy xarakterga ega bo'lib, vegetatsiya davri tugagach bu yerlar uchun xos bo'lgan chuqurlik 2-3 metrgacha pasaysa, vegetatsiya davrida 0,5-1,5 metrgacha ko'tariladi, mavsumiy tebranish amplitudasi 1,0-1,5 metrni tashkil etadi. Tuman hududining asosiy qismida, ularning qaysi geomorfologik rayonlarga mansubligidan qat'iy nazar maqbul chuqurlikdan ancha yuqori joylashganligi, o'z navbatida tuproq hosil bo'lish va tuproq sho'rlanish jarayonlarida faol ishtirok etadi.

Tajribalar shuni ko'rsatadiki, tuproq mexanik tarkibining yengillashishi bilan so'rish kuchi ham suvni ko'tarilish ustuni ham kamayadi, sho'rni yuvish yengillashadi, teskarisi bo'lsa, nafaqat yuvish qiyinlashadi, shuning bilan birga sho'r sizot suvlarning kapillyar bilan ko'tarilishidan tuproqning ildiz tizimi joylashgan chuqurliklarda paydo bo'lgan sho'r o'simlikka salbiy ta'sir ko'rsatadi.[4]

Ilmiy izlanishlar davomida shu narsa aniq bo'ldiki bu tuproqlarning mexanik tarkibidagi fizik loyning miqdori kanaldan uzoqlashgan sari o'zgarib boradi. Agar kanalga yaqinroq maydonlarda joylashgan yerlarda fizik loy miqdori 0-66 sm qalinlikda 30-32% bo'lsa, 200 va 300 m da joylashgan yerlarda bu fraksiyalar miqdori 40% ga qadar oshadi. O'rta qumoq fraksiyalari miqdori tuproq kesmasidagi gorizontlarda ko'payishi bilan bir qatorda, kanaldan uzoqlashgan sari maydonlarda og'ir qumoqli tuproqlar hosil bo'lishi kuzatiladi. To'plangan ma'lumotlarga asosan, o'rganilgan tuproqlarning mexanik tarkibi yuqoridagi qonuniyatlar asosida miqdor va sifat jihatidan o'zgarishi nafaqat tuproq hosil qiluvchi ona jins va relef ta'sirida bog'liq bo'lib balki muallaq oqizmalarning loyqalik darajasiga, sug'orish shaxobchalarining uzunligiga dalada joylashgan o'qariqlarda oqadigan suvlardagi zarrachalarning tarkibiga ham bog'liq. Buxoro tumani tuproqlari dasht tuproqlari mintaqasida tarqalgan.

Tumanning tuproqlari asosan sug'oriladigan taqir-o'tloki, sug'oriladigan o'tloqi-cho'l, sug'oriladigan o'tloqi, sug'oriladigan o'tloki allyuvial va botqoq-o'tloqi tuproqlardan iborat.

Sug'oriladigan taqir-o'tloqi tuproqlar o'zlashtirishni dastlabki davrida kam gumusligicha qoladi (0,7-0,8 %), azot esa 0,06-0,07 %. Tuproqlar mexanik tarkibiga ko'ra yengil, o'rta va og'ir qumoqli, qirrali chag'ir toshliroq, 0,5-1,0 m dan shag'al qatlamlar joylashgan.

Tuproqlarda karbonatlar miqdori 8-10 %. gacha bo'ladi. Tuproq kesimi bo'yicha ularning tarqalish mexanik tarkib bilan bog'liq. Taqirli-o'tloqi tuproqlar kuchsiz va o'rtacha darajada sho'rlangan. Tuzlar tarkibida asosan sulfatlar ustunlik qiladi.

Zarafshon daryosining qadimgi va hozirgi davr irmoqlarida hamda uning sohil va birinchi sohil oldi terrasalarida tarqalgan o'tloqi tuproqlar ichida kichkina massivlar tariqasida botqoq-o'tloqi tuproqlar uchraydi, ularning katta qismi sug'oriladi. Bu tuproqlar pastqam yerlarda sizot suvlari chuqurligi 0,5-1 m, kuchli sho'rlanish jarayoni sharoitida hosil bo'ladi. Shu sababli bu tuproqlar nafaqat botqoqlanishga, sho'rlanishga ham moyil.

Eskidan sug'oriladigan botqoq - o'tloqi tuproqlar birinchi sohil oldi terrasasida uchrab kam miqdorda sho'rlangan, qolgan sug'oriladigan botqoq - o'tloqi tuproqlar o'rta va kuchli darajada sho'rlangan.

Zarafshonning subaeral deltasida sug'oriladigan o'tloqi allyuvial tuproqlar eng kam tarqalgan. Ular sizot suvlari chuqurligi 1-2 m oralig'ida, ya'ni intensiv grunt-kapillyar namlanish sharoitida tarkib topadi. O'tloqi tuproqlar, avtomorf sharoitda gidromorf (o'tloqi) sharoitga tadrijiy o'zgarigan sharoitda, o'zlashtirish va ishlab chiqarishga jalb qilish, yaxshi ishlaydigan kollektor-zovurlar tarmog'i fonida o'tkazilishi kerak.

Xulosa. Sug'oriladigan o'tloqi tuproqlarni cho'l zonasining boshqa tuproqlariga solishtirilganda ular gumus miqdori (1,1-1,45 %) va azotga (0,08-0,12 %) birmuncha boy. Gumusni agroiirrigatsion oqizma loyqalarga chuqur kirib borishi tuproq kesimida uning zahirasini yuqori bo'lishini ta'minlaydi. Qadimgi allyuvial va delyuvial-prolyuvial yuzalarda tarkib topgan sug'oriladigan o'tloqi tuproqlarda gumus oz (0,5-0,7), chunki ularning o'tmishdoshi – sur-qo'ng'ir yoki taqirli tuproqlarda organik modda miqdori kam bo'lgan.

Bu tuproqlarda gips oz miqdorda (0,12-0,25 %) va u sho'rtoblanish jarayonini rivojlanishiga to'siq bo'la olmaydi. Shu sababli ildiz tarqalgan qatlamning quyi qismiga, ayrim hollarda singdirish sig'imi tarkibiga natriy va magniy ionining kirishi hisobiga sho'rlanish sodir bo'ladi. Sho'rlanish tuproqning suv o'tkazish ko'rsatkichlarini pasayishiga olib keladi. Tuproqni sug'orishlardan so'ng zichlashishi va boshqa salbiy xususiyatlarini vujudga keltiradi. Karbonatlilik tuproq kesimi bo'yicha tekis – 8,8-9,3 % SO₂. Umuman, sug'oriladigan o'tloqi tuproqlar birmuncha yuqori ishlab chiqarish qobiliyatiga ega va Buxoro viloyatining yer fondini qimmatli qismini tashkil etadi.

Zarafshonning hozirgi va qadimgi deltalari, shuningdek uning qayir va birinchi qayir usti terassasi maydonlaridagi sug'oriladigan o'tloqi tuproqlar orasidagi kichik massivlarda botqoq-o'tloqi tuproqlar joylashgan, ularning ko'p qismi sug'oriladigan tuproqlar hisoblanadi. Bu tuproqlar lokal botiqlarda sizot suvlari sathi 0,5-1 m bo'lgan, kuchli sho'rlanish jarayoni ketayotgan sharoitda tarkib topadi. Shuning uchun bu tuproqlar nafaqat botqoqlanish, balki sho'rlanishga ham uchraydi. Ular asosan kuchsiz va o'rtacha darajada sho'rlangan holatda uchraydi.

Mexanik tarkibiga ko'ra tuproqlar og'ir va o'rta qumoqli hisoblanadi. botqoq-o'tloqi tuproqlarning haydalma qatlamida gumus miqdori 3 % atrofida. Umumiy fosfor zahirasi, shuningdek kaliy bo'yicha bu tuproqlar kam ta'minlangan. (O'zbekiston Respublikasi tuproq qoplami Atlasi 2010 y.)

Yerlarning meliorativ holatini yaxshilashga qaratilgan tadbirlarni amalga oshirishda ham birinchi navbatda sog'lomlashtirishga muhtoj meliorativ ob'ektlarni to'g'ri tanlash nihoyatda muhim hisoblanib, bu masalaga ilmiy amaliy tomondan majmuaviy yondashish zarur.

ADABIYOTLAR:

1. *O'zbekiston Respublikasi yer resurslari, geodeziya, kartografiya, va davlat kadastri davlat qo'mitasi va "Tuproqshunoslik va agrokimyo ilmiy-tadqiqot davlat instituti tomonidan ishlab chiqilgan."* Sho'rlangan yerlarni xaritalashtirish, xisobga olish va sho'r yuvish me'yorlarini aniqlash bo'yicha uslubiy ko'rsatma". 2014 yil. 45-46 betlar

2. Умаров М. *Физические свойства почв районов нового и перспективного орошения УзССР.* - Ташкент, «Фан», 1974, -280 с.

3. Qurvontoyev R., Xalberdiyeva M.R. *Tuproqda qatqaloq hosil bo'lishini oldini olish usullari.* // Tezisi dok. res. konf., - Guliston, 1994.- 228 b.

4. Qurvontoyev R. *Tuproq unumdorligini oshirish usullari.* // *Tuproq unumdorligini oshirishning dolzarb muammolari, ilmiy to'plam.* -Toshkent, 1995. - B. 30-33.

5. *Qurvantoyev R., Turg'unov M., Musurmonov A. Tuproq unumdorligini oshirishda ular agrofizik xossalari e'tiborga olgan holda ishlov berish masalalari. // Tuproq resurslaridan samarali foydalanishning ilmiy asoslari. Maqolalar to'plami, - Toshkent, 2011. - B. 142-148.*
6. *Sattorov J.S. O'zbekiston sug'oriladigan tuproqlari unumdorligi o'zgarishi, uni oshirish va muhofaza qilish konsepsiyasi. "Atrof muhit o'zgarishi sharoitida yer resurslarini muhofaza qilish va ulardan oqilona foydalanish masalalari" mavzusidagi ilmiy-amaliy seminar. Toshkent. 2016 y. 70 bet.*
7. *O'zbekiston Respublikasi tuproq qoplamlari atlas. Toshkent. 2010 y. 18-19 bet*
8. *Artikova X.T. Buxoro vohasi tuproqlarning evolyusiyasi, ekologik holati va unumdorligi. Avtoref. dok. diss.(DSc). –Toshkent, 2019. 62 b.*
9. *Гафуров К., Абдуллаев С. Характеристика почвенного покрова орошаемой зоны Бухарской области. - Ташкент: Изд-во «Фан», 1982.-130 с.*
10. *O'zbekiston sug'oriladigan yerlarining meliorativ holati va ularni yaxshilash. Universitet nashriyoti. 2018 yil. 304 bet.*
11. *Kurvantayev R., Nazarova S.M. Zarafshon vohasi quyi oqimi sug'oriladigan o'loqi tuproqlarining agrofizikaviy holati. –Buxoro.2021.- 142 b.*
12. *Nazarova S.M., Kurvantayev R. Buxoro vohasi tuproqlari / "O'zbekiston qishloq xo'jaligi" jurnalining "Agro ilm" ilmiy ilovasi. –Toshkent, 2012. №3 (23). - B. 54-55*
13. *Турсунов Л. Водно-физические свойства и скорость реставрации солей в орошаемых почвах Каракульского оазиса Бухарской области. Автореферат. канд. дисс.- Ташкент. 1968.- 30 с.*
14. *Yuldosheva. X. Namozov.X. Sug'oriladigan xududlar tuproqlarning hozirgi meliorativ xolati va ularning unumdorligini biologik usullar bilan oshirish yo'llari."Fan va texnologiya", nashriyoti, 2020-284-298 bet.*

ОРГАНИК ДЕҲҚОНЧИЛИКДА СИДЕРАТ ЎСИМЛИКЛАРНИНГ АҲАМИЯТИ*Илёсов Аираф Акбарович,**Бухоро давлат университети**Агрономия ва тупроқшунослик кафедраси катта ўқитувчиси*

Аннотация. Ушбу мақола органик қишлоқ хўжалигида сидерат экинларининг, хусусан, лупиннинг аҳамиятини таъкидлайди. Уларнинг тупроқ унумдорлигига, экологик мувозанатга ва ҳосилдорликка ижобий таъсири таҳлил қилинади. Яшил гўнган фойдаланиши тупроқ структурасини яхшилаш, чиринди миқдорини ошириш, азот мавжудлигини ошириш, эрозияни камайтириш ва сувни тежаш контекстида муҳокама қилинади. Ўзбекистонда лупиннинг сидерат сифатида амалий қўлланилиши агротехника ва нав танлаш бўйича тавсиялар билан кўриб чиқилади.

Калим сўзлар: органик деҳқончилик, сидерат экинлари, лупин, гумус, тупроқ унумдорлиги, азот фиксацияси, эрозияга қарши кураш, сувни тежаш, агроэкология.

ЗНАЧИМОСТЬ ПОБОЧНЫХ КУЛЬТУР В ОРГАНИЧЕСКОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

Аннотация. В данной статье подчёркивается важность сидератов, в частности, люпина, в органическом земледелии. Анализируется их положительное влияние на плодородие почвы, экологический баланс и продуктивность. Использование сидератов рассматривается в контексте улучшения структуры почвы, повышения содержания гумуса, улучшения доступности азота, снижения эрозии и экономии воды. Рассматриваются практические применения люпина в качестве сидерата в Узбекистане с рекомендациями по агрономическим практикам и выбору сортов.

Ключевые слова: органическое земледелие, сидераты, люпин, гумус, плодородие почвы, фиксация азота, борьба с эрозией, экономия воды, агроэкология.

THE IMPORTANCE OF SIDERATE CROPS IN ORGANIC FARMING

Abstract. This article highlights the importance of siderate crops, particularly lupine, in organic agriculture. It analyzes their positive effects on soil fertility, ecological balance, and productivity. The use of green manure is discussed in the context of improving soil structure, increasing humus content, enhancing nitrogen availability, reducing erosion, and saving water. Practical applications of lupine as a siderate in Uzbekistan are examined with recommendations for agronomic practices and variety selection.

Keywords: organic farming, siderate crops, lupine, humus, soil fertility, nitrogen fixation, erosion control, water saving, agroecology.

Кириш. Сўнгги йилларда бутун дунёда органик деҳқончиликка бўлган кизиқиш ортиб бормоқда. Бунинг асосий сабаби, табиий ресурсларни муҳофаза қилиш, инсон саломатлигини таъминлаш ва экологик мувозанатни сақлаш эҳтиёжидир. Органик деҳқончилик — бу кимёвий ўғитлар, пестицидлар ва генетик ўзгартирилган организмлардан фойдаланмасдан, табиий усулларда ердан самарали фойдаланиб мўл ва сифатли ҳамда хавфсиз маҳсулот етиштиришни назарда тутди.

Органик деҳқончилик — бу табиий биологик жараёнларга таянадиган, инсон ва табиат ўртасидаги ҳамкорликни тиклашга қаратилган деҳқончилик усулидир. Унда минерал ўғитлар, кимёвий гербицидлар ва инсектицидлар, ГМОлар ҳамда сунъий воситалардан фойдаланишга йўл қўйилмайди.

Органик деҳқончиликнинг асосий тамойиллари:

Тупроқ унумдорлигини сақлаш ва тиклаш: Тупроқ тирик организмлар фаолиятига таянади.

Биохилма-хилликни сақлаш: экинлар ва навлар хима-хиллигидан фойдаланиш.

Кўп йиллик айланма экинлар: Ердан тўхтовсиз фойдаланиш эмас, уни дам олдириш (имконияти бўлса).

Сидератлар, компост ва табиий ўғитлардан фойдаланиш: Бу тупроқ учун барқарор озука манбасини шакллантириш.

Тадқиқот методологияси. Эрозияга қарши кураш чоралари: Тупроқ юзасини қопловчи ўсимликлар, тупроқни барқарор холатда сақлаш.

Шундай ёндашувда сидерат ўсимликлар муҳим ўрин тутди. Улар нафақат тупроқ унумдорлигини тиклашга ёрдам беради, балки агроэко-системанинг мувозанатини таъминлашда ҳам асосий омил сифатида намоён бўлади. Бу ўсимликлар ерда органик моддалар миқдорини оширади, тупроқ структурасини яхшилайдди, эрозияни камайтиради ва айниқса, тупроқни азот билан бойитишда муҳим аҳамият касб этади.

Сидератлар — бу махсус мақсадда етиштирилаётган ўсимликлар бўлиб, улар кейинчалик майдаланилиб тупроққа аралаштирилади ва тупроқ таркибида органик модда сифатида хизмат қилади. Улар "яшил ўғитлар" деб ҳам аталади.

Ҳозирда деҳқончиликда фойдаланилаётган асосий сидерат экинлар турлари

Кўнғирбошлар (Poaceae):

Жўхори, судан ўти, арпа, тритикале-Тез ўсади, тупроқ структурасини яхшилайдди.

Дуккакдошлар (Fabaceae):

Люпин, хашаки дуккакликлар, дуккакли дон экинлари, беда-тупроқни азот билан бойитади.

Бутгулдошлар ва бошқалар (Brassicaceae):

Турп, шолғом, кольраби.-Антисептик хусусиятга эга, зараркунандаларга қарши фойдали.

Сидератларнинг умумий хусусиятлари қуйидагилардан иборат:

Шудгорлангандан сўнг тупроқдан ювилиб ёки буғланиб кетмайдиган барқарор озуқа манбаи бўлади.

Тупроқни нам сақлаш қобилиятини оширади.

Илдиз қолдиқлари билан тупроқни юмшатади.

Сидератлар асосий экинлар оралиғида танаффусда, ёки куз-қиш мавсумида экилган ҳолда қўлланилади. Улар ерни қишда “очиқ” қолмаслигини таъминлайди ва экин майдонларининг “вакант” вақтидан самарали фойдаланиш имконини беради.

Масалан, кузда ғалла йиғиб олингач, бир йиллик сидератлар — люпин, жавдар, хантал, фацелия, тритикале экилса, улар куз-қиш-эрта баҳорда барвақт ўсиб ривожланади ва етарли миқдорда кўк масса ҳосил қилади. Ушбу масса майдаланиб тупроққа аралаштирилади ва баҳорда шудгорланади.

Олинган натижалар ва уларнинг таҳлили. Сидерат ўсимликларини тупроққа аралаштириш 25-30 кунлик бўлганда ёки гуллаш фазасида амалга оширилиши керак, чунки айнан шу муддатда улар таркибида органик моддалар миқдори юқори бўлади. Сидератлар 15-20 см чуқурликда шудгорланиб тупроққа аралаштирилади.

Сидерат ўсимликлар тупроққа қуйидаги агрохимёвий ва агрофизик таъсирларни кўрсатади:

-Дуккакдош сидератлар атмосферадан молекуляр азотни тўғридан-тўғри тупроққа ўзлаштиради.

Бу кимёвий азот ўғитларига бўлган эҳтиёжни камайтиради.

-Сидератлар гумус ҳосил бўлишига хизмат қилади, бу эса тупроқнинг унумдорлигини оширади.

-Илдиз тизими таъсирида тупроқ қулай структурага эга бўлади. Айниқса, капиллярларнинг тикланиши ва ҳаво алмашинуви яхшиланади.

-Баъзи сидератлар кислоталиликка мойил тупроқларни нейтраллаштиради.

Сидерат ўсимликлар тупроқ унумдорлигига кўрсатадиган таъсири қуйидагича:

-Сидерат ўсимликлар тупроққа аралаштирилгач, уларнинг органик массаси табиий ферментлар таъсирида парчаланиб, гумус ҳосил қилади. \

Бу гумус:

Тупроқнинг физик-кимёвий хусусиятларини яхшилайдди;

Озиқ моддаларни сақлаб қолади;

Биологик фаолликни оширади.

-Сидератлар микрофлора учун озуқа манбаи бўлиб хизмат қилади. Айниқса, ризосферада фойдали бактериялар, актиномицетлар ва замбуруғлар фаоллашади.

-Сидерат ўсимликлар ер юзини қоплаб туриши орқали шамол ва сув таъсиридаги эрозияни кескин камайтиради.

Улар:

Сувни сингдириш қобилиятини оширади;

Шамол таъсиридаги чанг кўтарилишини камайтиради.

Юқорида келтирилган ижобий таъсирларга қўшимча равишда сидерат ўсимликлар асосий экинларнинг чидамлилиги ва ҳосилдорликка қуйидагича таъсир кўрсатади:

-Тупроққа аралаштирилган сидератлар минераллашганда тупроқда фосфор, калий, азот ва микроэлементлар миқдори ортиб, кейинги экин учун етарли озуқа манбаини яратади.

-Аксарият сидератлар — айниқса, турп ва шолғом сингари бутгулдошлар — антисептик хусусиятга эга. Улар:

Нематодаларни камайтиради;

Ризоктониоз ва фитофтороз каби касалликларни олдини олади.

Ўтказилган тажрибалар натижаларига кўра, сидерат қўлланган майдонларда:

Ғалла ҳосилдорлиги 10–30% ошган;

Картошка, сабзавот экинлари 15–40% кўпроқ ҳосил берган.

Экологик ва иқтисодий жиҳатдан сидератларни қўллашнинг қуйидаги афзалликлари мавжуд:

Табиий минераллашув эвазига ўсимликлар озуқа билан таъминланиши кимёвий ўғитлардан воз кечиш имконини беради.

Бошқа экинлар билан қўшиб етиштириш Биохилма-хилликни сақлаш имконини беради.

Чорвачиликни экологик хавфсиз ем-хашак билан таъминлаш имконини беради.

Кимёвий ўғит харажатларини 30–50% камайтиради;

Ҳосилдорлик ортиши ҳисобига иқтисодий даромад ошади;

Узоқ муддатда ердан самарали ва барқарор фойдаланиш имконини яратади.

2020 йилдан сўнг жаҳонда кимёвий ўғитлар нархи сезиларли даражада ошгани сабабли, қўплаб фермерлар сидерат ўсимликлардан фойдаланишга ўта бошлади. Бу тенденция келажакда ҳам сақланиши кутилмоқда.

Ўзбекистондаги иқлим шароити — кескин континентал иқлими, ёзнинг иссиқлиги ва сув танқислиги шароитида кузда экилган тритикале, люпин турлари кузги ва қишдаги ёғинлардан самарали фойдаланиб ўсиб ривожланади ва кўк масса ҳосил қилади.

Бу борада ўтказилган дала тажрибаларини кўрсатишича Тошкент вилоятида кузги ғалладан кейин тритикале экилган майдонда беда ҳосилдорлиги 20% ортиб, тупроқда азот миқдори 30 кг/га га кўтарилган. Қашқадарёда люпин ва нўхат аралаш сидерат сифатида ишлатилганида тупроқнинг гумус миқдори 0.8% дан 1.2% га кўтарилган.

Ҳозирги кунда Сурхондарё ва Навоий вилоятларида сидератлар қўлланишга мойил ҳудудларда тупроқнинг физик ҳолатини тиклаш ва эрозияни камайтириш учун самарали восита сифатида қўлланилаётгани тўғрисида маълумотлар бор.

Ҳозирги вақтда хорижий мамлакатларда сидерат экинлардан кенг миқёсда фойдаланиб келинмоқда.

Мисол учун: Европа Иттифоқи мамлакатларида сидератлар экологик қишлоқ хўжалиги сиёсатининг асосий қисми ҳисобланади. Германия, Франция, Голландияда:

Люпин, вика, тритикале кенг қўлланилади.

"CAP" дастури орқали фермерларга сидерат экинлар учун субсидия ажратилади.

Агроэкологик ҳимоя учун сидератлар мажбурий тартибда экилмоқда.

Америка қўшма Штатлари ва Канадада:

Cover crops деб аталадиган сидератлар асосий экинлар билан параллел тарзда ҳам етиштирилади.

АҚШ Қишлоқ хўжалиги вазирлиги (USDA) томонидан сидерат дастурлари фермерлар даражасида қўллаб-қувватланади.

Аралаш сидерат турларини етиштириш, ва биоинокулянтлардан фойдаланиш оммалашган.

Япония ва Кореяда:

Органик деҳқончиликда сидератлар, айниқса, шопипоя майдонларида қўлланилади.

Ризобиум бактериялари билан бойитилган сидератлар кенг қўлланилади.

Тупроқ унумдорлиги ва сувни тежашда муҳим рол ўйнайди.

Австралияда:

Люпин Австралиянинг қуруқ зонасида юқори самара кўрсатган.

У ердаги фермерлар люпинни етиштириб, сидерат ва малакали ем-хашак сифатида ҳам ишлатишади.

Жанубий Америкада:

Бразилияда люпин қора тупроқларда сидерат сифатида экилиб, бир неча йилда тупроқ унумдорлигини 30–40% оширгани аниқланган.

Қуйида дунё бўйича люпиндан сидерат сифатида фойдаланилган майдонлар тақсимооти кўрсатилган. Маълумотлардан кўринишича, люпин кўп йиллар давомида айрим давлатлар қишлоқ хўжалиги амалиётида муваффақиятли татбиқ этилган:

Австралия — 1,1 миллион гектар майдон билан етакчи ҳисобланади. Бу ерда люпиннинг куруқчиликка чидамлилиги ва нутритив қиймати уни сидерат ва ем-хашак сифатида кенг татбиқ этилишига сабаб бўлган.

Бразилия — 0,85 млн гектар майдон билан иккинчи ўринда туриб, люпин тропик иқлимга мослашган сариқ навлари орқали тупроқ сифатини яхшилашда муҳим рол ўйнайди.

Германия ва Польша — Люпин асосий сидерат сифатида кўпчилик фермерлар томонидан ишлатилади, айниқса қишлоқ хўжалиги ерлари кучсиз кислотали ва унумдорлиги паст тупроқларга эга худудларда.

АҚШ — 0,6 млн гектар майдонда сидерат сифатида қўлланилади, асосан Жанубий ва марказий, шаркий худудларида органик деҳқончилик тизимларида.

Таҳлиллар шуни кўрсатадики, люпиннинг агробиологик хусусиятлари ва тупроқ сифатини яхшилашдаги самарадорлиги сабабли у дунё бўйича органик деҳқончиликда тобора кўпроқ қўлланилмоқда. Ўзбекистонда ҳам мазкур тажрибадан кенг фойдаланиш орқали тупроқ унумдорлигини ошириш, минерал ўғитларга бўлган қарамликни камайтириш ва иқтисодий самарадорликка эришиш мумкин.

Ўзбекистонда бу ҳолат яъни сидерат экинлардан фойдаланиш ҳолати қандай? Қандай муаммолар бор? Уларни қандай ечиш мумкин?

Ҳозирда бу борадаги муаммолар қуйидагилардан иборат:

- Аграр билим етишмаслиги: Сидератлар ҳақида етарли ахборот тарқалмаган.
- Уруғлик масаласи: Сидерат уруғларини топиш ва харид қилишда қийинчиликлар бор.
- Қисқа алмашлаб экиш тизимлари: Айрим худудларда сидератга вақт етишмайди.
- Сув танқислиги: Суғориш талаб қилувчи сидератлар мавжуд.

Хўш, бу муаммоларни қандай ҳал қилиш мумкин? Бунинг учун қуйидаги масалаларни ҳал қилишни тавсия этамиз:

- Агрономик билимларни ошириш- Фермерлар учун тренинглар ўтказиш.
- Маҳаллий уруғчиликни ривожлантириш -Миллий сидерат навларини яратиш.
- Қисқа вегетацияли сидератлардан фойдаланиш- Мисол: гречиха, рапс, бутгулдошлар.
- Томчилатиб суғоришни жорий қилиш-Сув тежамкор усуллардан фойдаланиш.

Сидерат ўсимликлар органик деҳқончиликнинг энг муҳим элементларидан бири бўлиб, тупроқ унумдорлиги, ҳосилдорлик, экологик барқарорлик ва иқтисодий самарадорликни оширишда катта аҳамиятга эга. Улар кимёвий ўғитларни қисман ёки тўлиқ алмаш-тиришга қодир, табиий муҳитни муҳофаза қилади ва барқарор қишлоқ хўжалиги ривожига хизмат қилади.

Дуккакли сидерат экинлари орасида люпин ўсимлиги Ўзбекистон шароитида кам ўрганилган ўсимликлари сирасига қиради. Люпин ўсимлигининг сидерат сифатида имкониятлари қандай? Ўзбекистон ва дунё тажрибасида бу борада қандай натижалар ва маълумотлар мавжуд?

Люпин (*Lupinus spp.*) — дуккакдошлар оиласига мансуб сидерат ва ем-хашак ўсимлиги бўлиб, азотни атмосферадан фиксация қилиш қобилиятига эга.

Ушбу ўсимлик:

- Қурғоқчиликка чидамли;
- Турли хил тупроқларда ўсиши мумкин (хатто кучсиз кислотали ва қумли тупроқларда ҳам) ;
- Чуқур илдиз тизимига эга бўлиб, тупроқнинг структурасини яхшилайди;
- Органик моддалар миқдорини кўпайтириб, гумус захирасини кўпайтиришда самарали ҳисобланади.

Люпин ўсимлиги органик деҳқончиликда:

- Ҳар бир гектар майдонда 100–200 кг азот фиксация қилади(айрим манбааларда бу кўрсаткич 400кг/га гача);
- Унумдорлиги паст тупроқлар структурасини яхшилаб, физик-кимёвий хоссаларини барқарорлаштиради;
- Ерда қолган органик моддалар парчаланганда тупроқ микрофлораси учун бой озуқа манбаига айланади.

Ўзбекистонда люпин етиштириш имкониятлари ва тажрибаси.

Иқлим ва тупроқ жиҳатидан:

Ўзбекистон шароити — хусусан, Қашқадарё, Сурхондарё, Жиззах ва Навоий вилоятларида люпин етиштириш учун қулай ҳисобланади:

Сув танқислиги мавжуд худудларда люпиннинг қурғоқчиликка чидамлилиги катта афзалликдир;

Кумли ва структуралilik паст даражадаги ерларда илдиз тизими орқали тупроқ структурасини яхшилади.

Илмий-тадқиқотлар натижалари:

Қарши аграр техникумида ўтказилган тажрибаларда люпин экиб чиқилган майдонларда кейинги беда ҳосили 18–25% га ортиши кузатилади;

Бошқа сидератларга нисбатан люпин гумус захирасини кўпайтиришда 20–30% самарали ҳисобланади.

Шунга кўра Ўзбекистон шароитида:

Люпинни кузда ёки эрта баҳорда экиш тавсия этилади;

Шудгорлаш вақтида люпин гуллаганидан кейин майдаланиб тупроққа аралаштирилса максимал таъсирга эришилади;

Люпинни тритикале ёки вика билан аралаштириб экиш орқали озикланиш спектрини кенгайтириш мумкин.

Ўзбекистон шароитида люпин ўстириш агротехникаси бўйича қуйидаги тавсияларни бериш мумкин:

-Ўзбекистоннинг кўплаб ҳудудлари — хусусан, Жиззах, Қашқадарё, Сурхондарё ва Навоий вилоятларининг курук ва ярим курук зоналари люпин учун мос ҳисобланади. Люпин:

-Кумли ва гумус билан кам таъминланган тупроқларда ҳам ўсиши мумкин;

8–10°C ҳароратда ўсимлик уруғлари униб чиқиб ўсиш ва ривожланиш давом этади;

-250–400 мм ёгингарчилик бўлса, ўсимликларни суғоришга ҳожат қолмайди.

Ўсимлик тур ва навларини танлаш.:

Айрим мамлакатларда махсус сидерат учун етиштириладиган люпин турлари мавжуд. Ўзбекистондаги тадқиқотларга кўра, белгиланган люпин турлари қуйидагича тавсия этилади:

Экиш технологияси:

Экиш вақти: Эрта баҳор (март охири – апрел бошлари) ёки кузда (сентябрда);

Экиш меъёри: 100–120 кг/га уруғ;

Шудгорлаш: Ерни 25–30 см чуқур шудгорлаш тавсия этилади;

Сидератлаш тартиби: Кенг қаторлаб экиш, гуллаганидан сўнг майдалаб тупроққа аралаштириш керак.

Люпиндан сўнг экиладиган асосий экинлар:

сабзавот экинлари (помидор, қовун, қалампир) — органик моддага эҳтиёжи катта бўлган экинлар;

Донли экинлар — буғдой ва арпа люпиндан сўнг яхши ўсади;

Полиз экинлари — сувни самарали ушлаб қолувчи люпиндан сўнг ҳосилдорлик ошади.

Экологик ва иқтисодий самара:

Люпин сидерат сифатида қўлланилганда, ҳар гектардан 50–60 кг минерал азот ўрнини босади;

Қўшимча минерал ўғит талабини 20–30% камайтиради;

Ҳосилдорликни 15–20% оширади;

Узоқ муддатда тупроқдаги гумус миқдори кўпаяди ва микробиологик фаоллик юксалади.

Бухоро вилояти шароитида люпиндан сидерат сифатида фойдаланиш истиқболлари.

Вилоятнинг абий-иқлим шароитлари таҳлили.

Бухоро вилояти асосан ярим чўл ва чўл зонасига киради. Иқлим қуйидагича:

Ёзда ҳарорат +45°C гача; Қишда 0°C атрофида;

Ёгингарчилик – йилига 100–150 мм атрофида;

Тупроқ — асосан сур тусли кўнғир, кумли ва таркибида гумус миқдори кам тупроқлар тарқалган.

Вилоятда тарқалган тупроқ турлари ва уларнинг агрофизик хусусиятлари

Асосий тупроқ тузилмалари:

1. **Ғовак бўз тупроқлар (ўрта механик таркибли):**

○ Нормал нам сақлаш қобилияти.

○ Ҳосилдорлик даражаси ўртача (25–30 ц/га пахта учун).

2. **Турли даражада шўрланган тупроқлар:**

○ Суғориш натижасида шўрланиш ва ер ости сувларини чиқариш муаммолари кузатилади.

○ Тузлар миқдори — 0,3–0,9%, баъзи ерларда — 1,2% гача.

Бухоро вилояти тупроқларининг агрофизик кўрсаткичлари (ўртача маълумотлар):

Кўрсаткич	Қиймати
Ҳажмий массаси	1,25 – 1,40 г/см ³
Сув ўтказувчанлиги	паст – ўртача
Ғоваклик	40–45%
Механик таркиб	қумлоқ ва хилталок тупроқлар

Кўриниб турибдики тупроқлар ғоваклик даражаси ва сувни саклаш қобилияти паст, бу эса тез куриб қолиш ва сув танқислигига олиб келади.

Агрокимёвий хусусиятлар.

Гумус миқдори:

Одатда **0,7–1,2%**, баъзи ҳудудларда 0,5% гача тушади.

Тупроқ унумдорлиги учун камида 2% гумус зарур ҳисобланади (FAO талаблари бўйича).

Вилоят тупроқлари таркибидаги макроэлементлар:

Элемент	Миқдори	Изоҳ
Азот (N)	паст даражада	Табиий ҳолда етарли эмас
Фосфор (P ₂ O ₅)	ўрта даражада	Фосфат ўғитларга эҳтиёж бор
Калий (K ₂ O)	кўп ҳолда етарли	Аммо фойдали шакли паст

Вилоятда тарқалган тупроқлар турли даражада шўрланган ва бу шўрланган ерларда ўсимлик ўсиши сусаяди, озука моддалари ўзлаштирилиши қийинлашади.

Биологик фаоллик ва микрофлора.

– Биологик фаоллик паст: микрофлора кам ва нофаол.

– Уреаза, фосфатаза ва каталаза фаоллиги паст даражада.

– Органик моддалар билан кам таъминлангани туфайли микроорганизмлар ривожланиши секин кечади.

Биологик фаолликни ошириш учун органик ўғитлар, сидератлар ва биопрепаратлар ни қўллаш зарур.

Бу борада вилоят тупроқларини ўрганиш мақсадида олиб борилган айрим илмий-тадқиқотлар натижаларидан олинган хулосаларни келтириб ўтиш ўринли бўлади.

Hilola Salimova (2021, ВухDU): “Тупроқларнинг мелорация қилиш тадбирларисиз аграр салоҳияти тўлиқ очилмайди. Биоферментлар билан бойитиш ва шўрлашга қарши агротадбирлар билан унумдорлик 2 баробаргача ошади.”

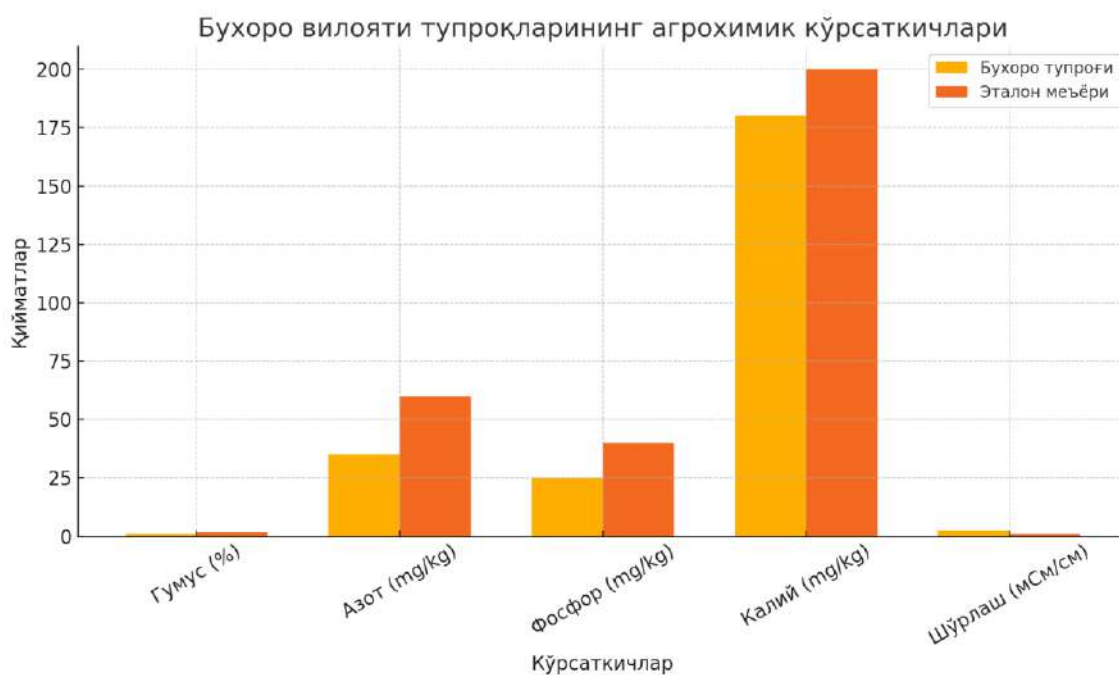
Rahimova M. (2023, ВухDU): “Микроорганизмлар фаоллигини ошириш тупроқнинг минерал моддалар айланишига бевосита таъсир кўрсатади. Биопрепаратлар қўлланилганда тупроқнинг агрофизик кўрсаткичлари ҳам яхшиланади.”

FAO ва ICARDA тавсиялари (2020): “Қуруқ зонадаги тупроқларда гумус миқдорини ошириш учун сидерат екиш, мулчлаш, микроорганик моддалар қўллаш ва ноанъанавий ўғитлар муҳим.”

Ушбу маълумот ва хулосаларга таянган ҳолда қуйидагича муаммо ва ечимлар жадвалини шакллантириш мумкин:

Муаммо	Ечим
Гумус миқдори паст	Органик ўғитлар (чиринди, компост) ва сидератлар
Шўрлаш	Сув режими ва захни чиқариш тизимини яхшилаш
Биологик фаоллик паст	Биопрепаратлар, яшил сув ўтлари
Азот ва фосфор етишмовчилиги	Минерал ва биоминерал ўғитлар

Бухоро тупроқларининг умумий ҳолати "шартли унумдор" деб баҳоланади, аммо оптималт ва илмий асосланган агротехник тадбирлар орқали уларни "юқори унумдор" ҳолатга олиб келиш мумкин.



Юқоридаги диаграмма Бухоро вилояти тупроқларининг асосий агрохимик кўрсаткичларини эталон меъёрлар билан солиштириб кўрсатади. Унга асосан қуйидаги хулосаларни чиқариш мумкин:

- **Гумус миқдори** — талаб этилган 2% дан анча паст.
- **Азот ва фосфор** — етишмовчилик бор.
- **Калий** — етарли даражада.
- **Шўрланиш** — меъёрдан юқори.

Ушбу шароитлар люпиннинг айрим навлари, хусусан, қурғоқчиликка ва қумли тупроққа мос навлар учун қулайдир. Люпин нафақат кам сув талаб қилувчи экин, балки азотни тупроқда тўпловчи ўсимлик сифатида муҳим аҳамиятга эга.

Хўш, Бухоро шароитида люпин ўсимлигини ўстириш борасида қандай тажрибалар ўтказилган?

Агротехнология ва тупроқшунослик соҳасида олиб борилган маҳаллий тажрибаларга кўра:

2021–2023 йилларда Жондор ва Ромитан туманларида люпиннинг Сарик люпин ва Кўк люпин навлари экилиб, гуллаш даврида тупроққа аралаштирилганда;

Тупроқда гумус миқдори 0.1–0.15% ошган;

Кейинги мавсумда экилган шולי ва жавдар ҳосилдорлиги 10–14% юқори бўлган;

Люпиндан кейин сув тежалиши 18–20% ни ташкил этган.

Иқтисодий ва экологик афзалликлар.

Минерал ўғитлар харажатлари 20–25% га камайган;

Люпин билан ишлов берилган ерда тбошоқли ўсимликларнинг ўсиши тезлашган;

Ҳаводаги азотни боғлаб тупроққа бериши орқали қишлоқ хўжалиги экинлари учун табиий ўғит бўлади.

Сидерат экин сифатида люпин ўсимлигидан фойдаланишни амалиётга татбиқ этиш истиқболлари:

Муаммолар ва ечимлар. Уруғ етиштириш етарли эмас — маҳаллий тажриба хўжаликларида уруғчилик базаси яратиш зарур;

Фермерлар хабардор эмас — агрономлар учун семинар ва тажриба мактаблари ташкил этиш керак;

Агротехника етарлича ўрганилмаган — институтлар билан ҳамкорликда илмий-амалий дастурлар жорий этиш керак.

Хулоса сифатида, Ўзбекистон шароитида люпин сидерат сифатида катта истиқболга эга. Бу ўсимликнинг тупроқни бойитиш қобилияти, қурғоқчиликка чидамлилиги ва кенг фойдаланиш имконияти уни органик деҳқончилик тизимида муҳим ўринга эга бўлишини таъминлайди.

Бухоро вилоятида люпинни сидерат сифатида қўллаш — бу нафақат тупроқ унумдорлигини ошириш, балки сув тежаш, маҳсулот сифатини яхшилаш ва органик деҳқончиликни ривожлантириш имкониятидир. Люпиннинг маҳаллий шароитга мос навларини экиш ва тегишли агротехник

тадбирларни қўллаш орқали Бухоро вилояти фермерлари юқори самарадорликка эришишлари мумкин.

Органик деҳқончилик тизимини ривожлантиришда сидерат ўсимликларининг, айниқса, люпиннинг тутган ўрни жуда муҳим. Тажрибалар ва таҳлиллар шундан далолат берадики, люпин:

Тупроқда азот миқдорини оширади;

Гумус тўплайди ва тупроқнинг физик-кимёвий хусусиятларини яхшилади;

Минерал ўғитларга бўлган қарамликни камайтиради;

Кейинги экинлар ҳосилдорлигини оширади;

Курук ва кам ресурсли худудлар учун иктисодий ва экологик жиҳатдан мақбул сидерат экин ҳисобланади.

Ўзбекистон, хусусан, Бухоро вилояти шароитида люпиндан сидерат сифатида самарали фойдаланиш орқали тупроқ унумдорлигини барқарорлаштириш ва органик деҳқончиликни ривожлантириш имкониятлари катта.

Амалий тавсиялар. Люпин экиш тизимини ишлаб чиқиш: ҳар бир худуднинг иқлим ва тупроқ шароитига мос нав танлаб, экиш-кетиш технологиясини такомиллаштириш.

Уруғчилик базаси яратиш: маҳаллий шароитга мос навларни етиштириш ва тарқатиш бўйича махсус марказлар фаолиятини кучайтириш.

Фермерларни ўқитиш: люпин сидерати ҳақида ахборот ва амалий кўникмалар бериш учун тренинглар, семинарлар ва кўрганмалар ташкил этиш.

Илмий тадқиқотлар ва мониторинг: люпиннинг тупроққа таъсири, сув тежашдаги ўрни ва ҳосилдорликка таъсири бўйича кузатувларни йўлга қўйиш.

Қонунчилик ва молиявий рағбатлар: сидерат экинлар экишни тарғиб қилувчи давлат дастурлари ва субсидиялар жорий этилиши мақсадга мувофиқ.

Амалий таклифлар:

Ўзбекистонда махсус “Сидерат дастури” қабул қилиш.

Фермерларга сидерат уруғларини субсидия асосида тақдим этиш.

Сидерат навларини яратиш бўйича илмий-тадқиқот ишларини кенгайтириш.

Сув таъминоти муаммолари бўлган худудларда қурғоқчиликка чидамли сидерат турларини тавсия қилиш.

Таълим муассасаларида сидератлар бўйича махсус курслар ташкил этиш.

Аграр хизматлар орқали сидерат агротехникаси бўйича амалий ёрдам кўрсатиш.

АДАБИЁТЛАР:

1. Назаров, А. (2020). *Ўзбекистонда органик деҳқончиликнинг истиқболлари*. Тошкент: Аграр наириёт.
2. ЮНЕСКО Агроиқлим маркази. (2022). *Сидерат ўсимликларнинг тупроқ унумдорлигига таъсири бўйича ҳисоботлар*. ЮНЕСКО наириёти.
3. Тошкент Қишлоқ Хўжалиги Институти. (2021). *Люпин – сидерат сифатида агрономик аҳамияти*. Тошкент: ТҚХИ наириёти.
4. Anderson, P. (2018). *Lupin as a green manure in dry regions*. *Journal of Sustainable Agriculture*, 12(3), 245–260. <https://doi.org/10.1080/jsa.2018.12.3.245>
5. Бухоро вилояти аграр илмий-тадқиқот маркази. (2023). *Люпин экиш тажрибаси ва таҳлиллари*. Бухоро: АИТМ наириёти.
6. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. (2021). *Cover crops and soil health: Global practices and perspectives*. Rome: FAO.
7. Камалов, Б.Ш. (2024). *Ўзбекистон шароитида сидерат экинлар агротехникаси*. Самарқанд: Илм-фан наириёти.
8. FAO. (2022). *Cover crops and green manures: Guidelines for sustainable agriculture*. Rome: FAO.
9. *United States Department of Agriculture (USDA)*. (2020). *Sustainable soil management: Soil systems guide*. Washington, D.C.: USDA. <https://www.nrcs.usda.gov/>
10. Мирзаев, Х. (2021). *Ўзбекистонда органик қишлоқ хўжалиги истиқболлари*. Тошкент: ЎЗР Фанлар Академияси.
11. Халимов, Б., ва бошқалар. (2019). *Агроэкология асослари*. Самарқанд: СамДАУ наириёти.
12. Жанобов, Ш.Ш. (2020). *Ўсимликшуносликда биологик усуллар*. Қариш: ҚарДУ наириёти.
13. Müller, J. (2018). *Green manure crops in Europe: A review*. *Agronomy Journal*. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.01.0012>

14. Han, Y., Zhang, W., Liu, H., & Chen, D. (2021). Cover crops and soil microbial dynamics: A meta-analysis. *Soil Biology & Biochemistry*, 154, 108150. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108150>
15. International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM). (n.d.). *Principles of Organic Agriculture*.
16. Салимова Х. (2021). Бухоро вилояти тупроқларининг агробиологик ҳолати. БухДУ, Илмий тўплам.
17. Раҳимова М. (2023). Тупроқ унумдорлиги ва биопрепаратлар самарадорлиги. // *Агробиология журнали*.
18. FAO (2020). *Soil fertility management in arid lands: Guidelines for sustainable agriculture*. Rome: FAO Publications.
19. ICARDA (2020). *Salt-affected soils and their management in Central Asia*. Tashkent: ICARDA Uzbekistan Office.
20. Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси (2022). *Ўзбекистон тупроқлари ва улардан самарали фойдаланиш*. Тошкент.

К ИЗУЧЕНИЮ ВОДНО-БОЛОТНОЙ ФЛОРЫ БУХАРСКОЙ ДОЛИНЫ**Шаронова Шахноза Рахматиллоевна,**докторант Бухарского государственного университета,
доцент кафедры Биотехнологии и безопасность пищевых продуктов
sh.r.sharopova@buxdu.uzORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6112-6665>**Саидов Улугбек Махмудович,**студент Бухарского государственного университета
ulugbekbiolog.20050501@gmail.com**Бакаева Севинч Суннатиллоевна,**студентка Бухарского государственного университета
bakoyevasevinch@gmail.com

Аннотация. В составе водно-болотной флоры Бухарской долины много реликтных (риччия плавающая, марсилия четырёхлистная, сальвиния плавающая, ряска малая и трёхдольная, леерзия рисовидная, гидрилла мутовчатая, пузырчатка обыкновенная и др.) видов, распространённых в основном в равнинных районах Бухарской долины. Наличие их указывает на генетическую связь флоры Бухарской долины с водно-болотной флорой влажных тропических лесов третичного периода.

Ключевые слова: Бухарская долина, водно-болотная флора, флористический состав, водоём, пустыня, адыр, степь.

TO THE STUDY OF THE WETLAND FLORA OF THE BUKHARA VALLEY

Abstract. The aquatic and marsh flora of the Bukhara Depression harbours a notable assemblage of relict species — among them *Riccia fluitans*, *Marsilea quadrifolia*, *Salvinia natans*, *Lemna minor* and *L. trisulca*, *Leersia oryzoides*, *Hydrilla verticillata*, and *Utricularia vulgaris* — that are largely confined to the low-lying sectors of the depression. Their presence points to a phylogenetic link between the wetland vegetation of the Bukhara Depression and the hygrophilous flora of the humid Tertiary tropical forests.

Keywords: Bukhara valley, water and swamp plants, plant list, lake or pond, desert, low hill, dry grassland.

BUXORO VODIYSI SATLIQ ER FLORASINI O'RGANISH

Аннотация. Бухоро vodiysining botqoqli florasi asosan Buxoro vodiysi tekisliklarida tarqalgan ko'plab relikt turlarini (*Riccia natans*, *Marsilea quadrifolia*, *Salvinia natans*, *Lemna minor* va *Trifoliate*, *Leersia ricoides*, *Hydrilla verticillata*, *Bladderwort* va *boshqalar*) o'z ichiga oladi. Ularning mavjudligi Buxoro vodiysi florasi va uchinchi davr tropik tropik o'rmonlarining suv-botqoq florasi o'rtasidagi genetik bog'liqlikdan dalolat beradi.

Kalit so'zlar: Buxoro vodiysi, botqoq o'simliklari, floristik tarkibi, suv ombori, cho'l, adir, dasht.

Введение. Флора и растительность водоёмов Бухарской долины до сих пор не подвергались специальному изучению. Мы выявили 127 видов растений, принадлежащих 30 родам 41 семейству. Из них 10 видов (сальвиния плавающая, рогоз широколистный, рдест курчавый, намирский и нитевидный, гидрилла мутовчатая, леерзия рисовидная, ряска трёхдольная, щавель водяной, водяная сосенка) для Бухарской долины указаны впервые, водно-болотная флора представлена мохообразными (типиноводный мох) (3), папоротникообразными (3), хвощевыми (2) и высшими цветковыми (149) видами. (1-таблица)

Обнаруженные виды по продолжительности жизни распределяются на однолетники - 34 вида (21,7%), двулетники - I (0.6%) и многолетники - 122 (77,7%).

Распределение видов водно-болотной флоры между отдельными семействами

Семейство	К-во родов	К-во видов	Семейство	К-во родов	К-во видов
<i>Ricciaceae</i>	2		<i>Chenopodiaceae</i>	2	3
<i>Equisetaceae</i>	1	2	<i>Ceratophyllaceae</i>	1	2
<i>Typhaceae</i>	1	5	<i>Ranunculaceae</i>	2	5
<i>Sparganiaceae</i>	1	2	<i>Cruciferae</i>	2	2
<i>Potamogetonaceae</i>	3	12	<i>Rosaceae</i>	1	2
<i>Najadaceae</i>	1	3	<i>Requiminosae</i>	1	3
<i>Alismataceae</i>	2	3	<i>Onagraceae</i>	1	3
<i>Hydrocharitaceae</i>	2	2	<i>Halorrhagidaceae</i>	1	2
<i>Gramineae</i>	25	32	<i>Primulaceae</i>	2	2
<i>Cyperaceae</i>	8	23	<i>Convolvulaceae</i>	2	2
<i>Lemnaceae</i>	1	2	<i>Labiatae</i>	4	5
<i>Juncosese</i>	1	3	<i>Scrophulariaceae</i>	1	3
<i>Orchidaceae</i>	1	3	<i>Plantaginaceae</i>	1	2
<i>Polygonaceae</i>	2	8	<i>Compositae</i>	5	

Методология исследования. Флора водоёмов Бухарской долины представлена следующими экологическими группами: гигрофиты - 77 (49%), гидрофиты - 51 (32,5%), гидатофиты - 21 (13,4%), аэро-гидатофиты - 8 видов (5,1%).

На основании анализа современных ареалов водно-болотной флоры Бухарской долины мы выделили несколько флористических элементов: космополиты - ареалы, выходящие за пределы Голарктики: (тростник обыкновенный, хвощ полевой, рдест пронзеннолистный, рупия морская и др.); включают 31 вид (19,75%) от общего количества видов, указанных для Бухарской долины;

Голарктический объединяет ареалы, охватывающие Евразию и Северную Америку (папоротник болотный, сальвиния плавающая, рдест блестящий и плавающий и др.) и представлен 38 видами (24,2%);

евразиатский охватывает ареалы Европы и Азии (частуха подорожниковая, вейник тростниковидный и др.) и включает 61 вид (38,8%);

азиатский объединяет ареалы Азии (наяда злаковая, императа цилиндрическая и др.) и представлен 20 видами (12,75%);

среднеазиатский охватывает ареалы, не выходящие за пределы Средней Азии (рдест памирский и др.), и включает 7 видов (4,5%).

В составе водно-болотной флоры Бухарской долины много реликтных (риччия плавающая, марсилия четырёхлистная, сальвиния плавающая, ряска малая и трёхдольная, леерзия рисовидная, гидрилла мутовчатая, пузырчатка обыкновенная и др.) видов, распространённых в основном в равнинных районах Бухарской долины. Наличие их указывает на генетическую связь флоры Бухарской долины с водно-болотной флорой влажных тропических лесов третичного периода [8; 56-62].

По характеру распределения водно-болотная флора Бухарской долины подчинена общезональным климатическим условиям. Здесь значительное место занимают галофильные виды (рдест гребенчатый, рупия морская, камыш прибрежный, клубнекамыш морской и др.). Особенно много на засоленных влажных берегах равнинных водных бассейнов гигрогалофитов. Такие растения, как солерос, аджерек прибрежный, триглохин болотный, образуют фоновые заросли в прибрежьях пустынных водоёмов.

Таким образом, наличие в составе водно-болотной флоры Бухарской долины реликтных тропических и эндемичных видов, широкое распространение галофильных форм указывают на своеобразие растительного покрова водоёмов Бухарской долины.

Отсутствие в растительном покрове многих нимфейдов (кувонки, кубышки, лотос, водяной орех и др.) подчёркивает своеобразие растительности водоёмов этой долины, вызванное

специфическим комплексом её природных условий (резкое колебание уровня воды в водоёмах, засоленность, низкая прозрачность и др.) [3; 50-54].

Анализ полученных результатов. Наблюдения показали, что водоёмы отдельных высотных поясов резко отличаются по флористическому составу и структуре растительности. Так, равнинные водоёмы богаче типично водными видами, чем горные и высокогорные. Бедность видов, прежде всего, связана с коротким летом, низкой температурой воздуха, воды и неразвитым грунтом. В горах и высокогорьях много различных мхов, не развиты тростники, рогозы, ежеголовники, совершенно отсутствуют стралолисты, нимфейды, малочисленны харовые водоросли.



Избирательный отбор водорослей

Есть виды, ограниченные в своём распространении только отдельным высотным поясом [1; 34-39]. Например, для пояса пустыня характерны сальвиния плавающая, марсилия четырёхлистная, руппия морская, занникеллия болотная, наяда злаковая, стрелолист трилистный, валиснерия спиральная и др., для адыра юнкеллус серотинус, пикреус глобозус, для пояса тау - карекс коаркта, к.полифилла, кипрей мелкоцветный и др., для степи - дешампзия коелернойцес, примула памирская и др. Другие виды характерны почти для всех высотных поясов Бухарский долины. Так, например, тростник найден во всех поясах, кроме водоёмов высокогорья, уруть крылатая, рдест нитевидный также имеют широкие поясные распределения, встречаясь в поясах пустыня адыр, тау и даже степи. Это связано в основном с широким диапазоном экологических амплитуд отдельных видов, а также микроклиматическими особенностями отдельных горных котловин, ущелий и склонов.

Распределение растительности по водоёмам связано с гидрохимическими и гидробиологическими особенностями отдельных водоёмов. Так, для коллекторно-дренажных систем (коллекторы и зауры) со слабым течением воды характерны хары (*Chara foetida*, *Chara sp.sp.*), жерухи (*Nasturtium fontanum*), Вероники (*Veronica magallis-aquatia*), которые встречаются также во всех родниковых водоёмах [2; 17-19].

Это, видимо, связано со сходством их гидробиологических и гидрохимических режимов. Все они в основном питаются подземными грунтовыми водами. Степень засоленности их колеблется в пределах 0,4-1,8 г/л. Характер засоления гидрокарбонатно-кальциевый, а иногда гидросульфатно-кальциевый.

В наших данных, которые мы выше, указанные показатели совпадают с некоторыми показателями, изученными в Ферганской долине. В пресноводных озёрах видовой состав водных высших растений богат и разнообразен. Примером могут служить озёра Минбулак (26 видов), Калгандарья (19 видов), Карашар (25 видов) и др. Эти виды экологически разнообразны и в зависимости от глубины котловины водоёма расположены полосами. В этих же озёрах нашли приют такие пресноводные растения, как пузырчатка обыкновенная, сальвиния плавающая, уруть мутовчатая и многие другие, которые в других равнинных водоёмах или совершенно отсутствуют, или встречаются очень редко [6; 90-97].

В солоновато водных и солёных озерах (озеро Сарыкджуга) характерные для пресных водоёмов растения в большинстве случаев отсутствуют. Тростники, рогозы и другие виды чувствуют себя в этих озёрах угнетённо, образуют редкие (10-30 шт/м²) стебли и низкорослые (1,5-2,5 м) заросли. Из погружённых в воду чаще всего встречаются руппия морская и клубнекамыш, а из прибрежных - солерос, Адкерек и др.



В мелких заболоченных местах, а также загрязнённых органическими веществами сбросовых водоёмах широко представлены рдест малый, ряска малая, рдест широколистный, жеруха ключевая, роголистник тёмно-зелёный и др. Они особенно широко представлены в водоёмах, в той или иной степени загрязнённых очищенными или неочищенными коммунально-бытовыми стоками. Как известно, в воде, содержащей хозяйственно-фекальные отходы, растут эври- и мезосапробные виды, следовательно, названные выше растения целиком можно отнести к сапробным видам водно-болотных растений и использовать в качестве индикаторов загрязнённых коммунально-бытовыми стоками водоёмов.

Вывод. Водно-болотная флора Бухарской долины представляет собой уникальный комплекс, включающий 127 видов высших сосудистых, мохообразных и водорослевых растений, среди которых выявлены реликтовые и эндемичные таксоны. Установлено преобладание многолетних гидрофитов и гигрофитов (77 %), что отражает их адаптацию к нестабильному гидрологическому режиму и засолённости. Географическое распределение видов подчиняется высотной поясности и гидрохимическим особенностям водоёмов. Отсутствие типичных нимфейных и обилие галофильных форм подчёркивают своеобразие растительного покрова, сформированного под влиянием аридного климата и третичной флорогенетической связи.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дакиева М. К., & Хашиева Л. С. (2020). Биоэкологическая структура водно-болотного флористического комплекса равнинной части Республики Ингушетия. // *Ин экология и природопользование* (pp. 128-131).
2. Царук О., Винчевский Д., Крайнюк В., Смелянский И., Соболев Н., Калащян М., ... & Кухарук, Е. *Сельскохозяйственные территории высокой природной ценности of субрегиона ВЕКЦА.*
3. Кунашева М. А., & Шхагапсоев С. Х. (2006). Систематическая структура водно-болотной флоры КБР. // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. // Естественные науки, (S11), 61-66.*
4. Филиппов Д. А., & Бобров Ю. А. (2016). Флора малых водоёмов города Вологды и анализ её структуры. // *Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал, (4), 32-44.*
5. Барсебян А. М. (1956). *О геоботаническом изучении водно-болотной растительности Араратской равнины.*
6. Гонтарева М. Ю. (2016). Анализ водно-болотной флоры ландшафтно-аквальных комплексов Костанайской области. *Председатель Оргкомитета: ректор ЧГПУ, к. п. н. ВВ Садырин., 19, 141.*
7. Литвинюк Г. И., & Якубовская Т. В. (2014). Особенности водно-болотной и прибрежной флоры корчёвского межледниковья Беларуси.
8. Ким Л., Буриев С. *Альгофлора очистных водоемов животноводческих комплексов Ташкентской области и ее роль в биологической очистке сточных вод // Биология и биотехнология микроорганизмов.- Ташкент, Фан. 1989.-С 120-124.*

TOSHKO'MIR VA KOKOS PO'STLOG'I ASOSIDA TAYYORLANGAN AKTIVLANGAN KO'MIRLAR YORDAMIDA ERKIN QOLDIQ XLORNI OLIB TASHLASH JARAYONINI BAHOLASH

Raximov Alisher Xudoyberdi o'g'li,

Qarshi davlat texnika universiteti

Oziq-ovqat mahsulotlar texnologiyasi kafedrasida katta o'qituvchisi

alisherrakhimov35@gamil.com

Annotatsiya. Ushbu tadqiqotda erkin qoldiq modda yani xlorni aktivlangan ko'mirdan foydalanib erkin qoldiq modda yani xlorni ajratish jarayoni o'rganiladi. Aktivlangan ko'mirlar ko'mir asosida aktivlangan ko'mir I ni va kokos po'stlog'idan aktivlangan ko'mir 2 yaratib olinadi. Aktivlangan ko'mir I ning faol sirt maydoni aktivlangan 2 ga qaraganda kattaroq ekanligi aniqlandi. Erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash samaradorligi vaqt o'tishi va adsorbent miqdori ortishi bilan oshdi. Erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash mexanizmi gipoxlorit kislota yoki gipoxlorit ionining aktivlangan ko'mir bilan o'zaro reaksiyaga kirishishi natijasida sodir bo'ladigan dextrorizatsiya jarayoni ekanligi aniqlandi. Shuningdek, aktivlangan ko'mir I ichimlik suvidagi erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlashda samarali ekanligi ko'rsatildi. Shuningdek, aktivlangan ko'mirning ichimlik (kran) suvidagi erkin qoldiq xlorni olib tashlashdagi samaradorligi mahalliy tadqiqotlarda ham tasdiqlangan[9]. Adsorbsion kolonna usulida erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash uchun optimal sharoitlar quyidagicha belgilandi: fazoviy tezlik (FT) — 306 soat⁻¹; chiziqli tezlik (CHT) — 6,1 m/soat, harorat — 20 °C. [6,8]

Kalit so'zlar: aktivlangan ko'mir, erkin qoldiq yani xlor, gipoxlorit kislotasi, gipoxlorit ion.

ОЦЕНКА ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ СВОБОДНОГО ОСТАТОЧНОГО ХЛОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ, ПОЛУЧЕННОГО НА ОСНОВЕ КАМЕННОГО УГЛЯ И КОКОСОВОЙ СКОРЛУПЫ

Аннотация. В данном исследовании изучен процесс удаления свободного остаточного хлора с использованием активированного угля. Активированный уголь был получен на основе каменного угля (АК1) и кокосовой скорлупы (АК2). Установлено, что удельная поверхность АК1 значительно выше по сравнению с АК2. Эффективность удаления свободного остаточного хлора возрастала с увеличением времени контакта и дозы адсорбента. Механизм удаления свободного остаточного хлора обусловлен процессом дехлорирования, происходящим в результате взаимодействия гипохлоритной кислоты или гипохлорит-иона с поверхностью активированного угля. Показано, что активированный уголь АК1 эффективно удаляет свободный остаточный хлор из питьевой воды. Кроме того, эффективность активированного угля при удалении свободного остаточного хлора из водопроводной воды была подтверждена в ряде локальных исследований [9]. Оптимальные условия удаления свободного остаточного хлора в адсорбционной колонне были определены следующим образом: пространственная скорость (SV) — 306 ч⁻¹; линейная скорость (LV) — 6,1 м/ч; температура — 20 °C [6,8].

Ключевые слова: активированный уголь, свободный остаточный хлор, гипохлоритная кислота, гипохлорит-ион.

EVALUATION OF THE REMOVAL PROCESS OF FREE RESIDUAL CHLORINE USING ACTIVATED CARBONS DERIVED FROM COAL AND COCONUT SHELL

Abstract. This study investigates the removal of free residual chlorine using activated carbon. Activated carbons were prepared from coal (AC1) and coconut shell (AC2). The specific surface area of AC1 was found to be significantly larger than that of AC2. The removal efficiency of free residual chlorine increased with increasing contact time and adsorbent dosage. The removal mechanism was identified as a dechlorination process resulting from the interaction of hypochlorous acid or hypochlorite ions with the activated carbon surface. In addition, AC1 was shown to be effective in removing free residual chlorine from drinking water. The

effectiveness of activated carbon in removing free residual chlorine from tap water has also been confirmed by local studies [9]. The optimal conditions for free residual chlorine removal in an adsorption column were determined as follows: space velocity (SV) — 306 h⁻¹; linear velocity (LV) — 6.1 m/h; temperature — 20 °C [6,8].

Keywords: *activated carbon, free residual chlorine, hypochlorous acid, hypochlorite ion.*

Kirish. Gipoxlorit kislota (HClO) istimol suvni xlorlash paytida, xususan Cl₂ suvda eritilganda paydo bo'ladi. Suv muhitida erkin xlor ikki ko'rinishda paydo bo'ladi: HClO va ClO⁻. Erkin xlor suvni dezinfeksiya qilishda keng qo'llaniladi. Agar suv tarkibida ammiak, aminlar va shunga o'xshash birikmalar bor bo'lsa, ular erkin xlor bilan reaksiyaga kirishib, birikkan xloraminlarni (monoxloramin, dixloramin va boshqalar) paydo qiladi. Erkin xlor va birikkan xlor birgalikda qoldiq xlor deb ataladi.

Suvni tozalashda xlor qo'llanilishi yoqimsiz hid va ta'm paydo bo'lishiga olib kelishi mumkin. Bundan tashqari, qoldiq modda yani xlarning organik moddalar (masalan, gumin moddalari) bilan reaksiyasi natijasida zararli xlororganik birikmalar guruhi hosil bo'ladi. Shu sababli ko'plab iste'mol qiluvchilar suv tarkibidan xlorni olib tashlashni afzal ko'rishadi. Erkin xlarning bakterialarga qarshi faolligi birikkan xlornikiga nisbatan yuqoriroqdir. Ushbu tadqiqotda suv eritmasidagi erkin xlor konsentratsiyasiga alohida e'tibor qaratildi. [6,8]

Aktivlangan ko'mir (AK) gaz va suyuqlik oqimlaridan ifloslantiruvchi moddalarni ajratib tashlashda ko'p qo'llaniladi. AK suvdan erkin xlorni unumli tarzda yo'qotadi. Qoldiq xlorni aktivlangan ko'mir yordamida ajratib olish bo'yicha bir qator tadqiqotlar mavjud. Shuningdek, Naseer va hamkorlar sun'iy neyron tarmoqlari yordamida qoldiq xlor konsentratsiyasining "to'yinish nuqtasi" egri chiziqlarini prognozlash va modellashtirish mumkinligini ko'rsatganlar.

Aktivlangan ko'mir suvni tozalash texnologiyalarida, xususan qoldiq xlorni kamaytirishda unumli adsorbent sifatida keng ko'lamda qo'llaniladi. Ushbu holat xorijiy manbalar bilan bir qatorda O'zbekiston olimlari tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda ham qayd etilgan [9,10]. Istimol suvi tarkibidagi turli anion va kationlar mavjudligiga qaramasdan, aktivlangan ko'mir yordamida dexlorizatsiya jarayonini amalga oshirish mumkinligi ko'rsatilgan [11].

Biroq, istimol suvidan erkin xlorni ajratib olishda aktivlangan ko'mirdan foydalanish bo'yicha ilmiy ishlar soni kam. Chunki istimol suvi tarkibida ko'plab anionlar, kationlar va organik moddalar mavjud. Shu sababli erkin qoldiq modda yani xlorni aktivlangan ko'mir yordamida ajratib olish jarayonini o'rganish muhim ahamiyatga ega. Bundan tashqari, olingan natijalar atrof-muhit kimyosi (sirt kimyosi, umumiy kimyo va neft-kimyo yo'nalishlari)ni tahlil qilishga ham hissa qo'shadi.

Mazkur tadqiqotda erkin xlorni aktivlangan ko'mir yordamida ajratib olish jarayoni kontakt vaqti, adsorbent miqdori va pH ta'sirini hisobga olgan holda o'rganildi. Shuningdek, aktivlangan ko'mir yordamida istimol suvidagi erkin xlorni kamaytirish va adsorbent kolonna usulida erkin xlarning "to'yinish nuqtasi" egri chizig'i tadqiq etilishi isbotlandi.

Materiallar va metodologiya. Natriy gipoxloritni Navoiy tumanida joylashgan "Navoiyazot" aksiyadorlik jamiyati korxonasidan xarid qilindi. Adsorbent sifatida toshko'mir asosida olingan aktivlangan ko'mir (AK1) va kokos po'stlog'idan tayyorlangan aktivlangan ko'mir (AK2) Toshkentdagi "Al-kimyo" savdo fermasidan sotib olindi. Aktivlangan ko'mir zarrachalarining o'lchami 300–500 mkm oralig'ida saralandi. Tajribalar oldidan aktivlangan ko'mir distillangan suv bilan yuvildi va 0,22 va 0,45 mkm li membranali filtr orqali filtrlandi [7].

Erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlashga kontakt vaqti, adsorbent miqdori va pH ning ta'siri. AK1 yoki AK2 dan 20 mg miqdorda olib, 50 ml hajmdagi 4,0 mg/l konsentratsiyali natriy gipoxlorit eritmasiga qo'shildi. Olingan suspenziyalar 20 °C haroratda, 100 ayl/min tezlikda 1,0; 2,0; 5,0 va 7,0 soat davomida chayqatildi va kutilgan natijaga erishilmadi va yana bir soat qo'shimcha aylantirildi va 8 soatdan ko'proq vaqtda muvozanat adsorbentiyasi yuzaga kelishi aniqlandi

Chayqatib bo'lingan suspenziyalar 0,45 mkm li membranali filtr orqali filtrlandi. Eritmadagi erkin qoldiq modda yani xlor (HClO va ClO⁻) konsentratsiyasi SI "Uzbek Center for Scientific Testing and Quality Control" dagi kolometr HI701 Checker portativ o'lchov asbobi yordamida aniqlandi. O'lchashda 10 ml namunaga DPD reaktivi qo'shib, 20-22 soniya davomida chayqatildi va erkin qoldiq modda yani xlor miqdori o'lchandi.

Shu bilan birga, AK1 yoki AK2 dan 2,5,7–20 mg miqdorlarda olib, 50 ml hajmdagi 4,0 mg/l natriy gipoxlorit eritmasiga qo'shildi va 20 °C da 8 soatdan ko'proq vaqt davomida chayqatildi. Eritmadagi erkin qoldiq modda yani xlor miqdori yuqorida keltirilgan usul bilan aniqlandi.

CHEMISTRY

pH ta'sirini o'rganish uchun AK1 yoki AK2 (20 mg) 4,0 mg/L natriy gipoxlorit eritmasiga qo'shildi, pH qiymati xlorid kislotasi yoki natriy gidroksid yordamida sozlandi va olib tashlangan erkin qoldiq modda yani xlor miqdori o'lchandi.[3,8]

Aktivlangan ko'mir yordamida kran suvidagi erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash. Adsorbent miqdorining istimol suvidagi erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlashga ta'siri o'rganildi. Tajribalarda gipoxlorit qo'shilgan istimol suvi (boshlang'ich konsentratsiya 4,0 mg/L) va AK1 ishlatildi. Erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlashga kontakt vaqti, adsorbent miqdori va pH ning ta'siri bo'limda bayon qilingan usulga muvofiq bajarildi.

Istimol suvidagi nitrat, nitrit va ftorid ionlari SI "Uzbek Center for Scientific Testing and Quality Control" dagi ion xromatograf yordamida aniqlandi istimol suvidagi erkin qoldiq xlorni olib tashlash jarayonini baholashda mahalliy sharoitlar va suv tarkibining xususiyatlari inobatga olindi. Ushbu yondashuv O'zbekiston hududidagi suv tozalash texnologiyalariga bag'ishlangan adabiyotlarda keltirilgan metodik tavsiyalar bilan mos keladi [9,10].

Kolonka yordamida erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash uchun "to'yinish nuqtasi" egri chizig'i

Adsorbent sifatida AK1 ishlatildi. Adsorbent kalonna tajribasi uchun sharoitlar quyidagicha belgilandi:

- **1-sharoit:** erkin qoldiq modda yani xlarning boshlang'ich konsentratsiyasi — 3,8 mg/l; fazoviy tezlik (FT) — 306 soat⁻¹; chiziqli tezlik (CHT) — 6,1 m/soat; oqim tezligi — 2,0 ml/min; adsorbent massasi — 288,2 mg; harorat — 20 °C; qatlam balandligi — 2 sm.

- **2-sharoit:** erkin qoldiq modda yani xlarning boshlang'ich konsentratsiyasi — 3,7 mg/l; FT — 613 soat⁻¹; CHT — 3,1 m/soat; oqim tezligi — 1,0 ml/min; adsorbent massasi — 7,85 mg; harorat — 20 °C; qatlam balandligi — 0,5 sm.

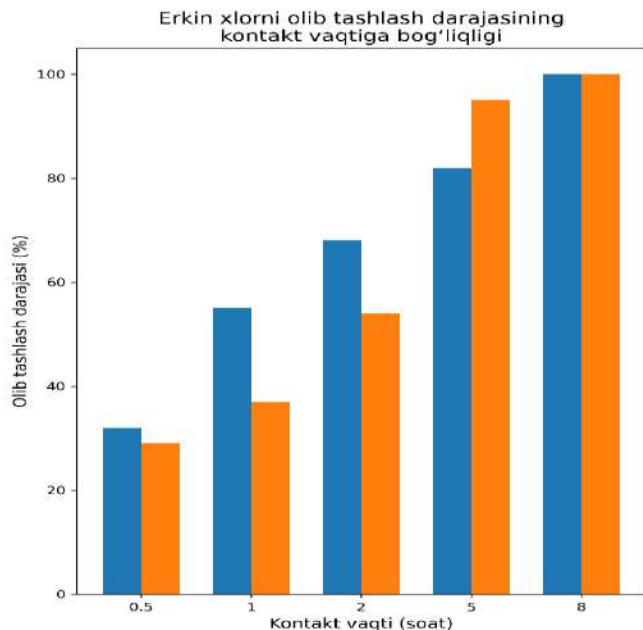
Natijalar va muhokama. *Aktivlangan ko'mirlarning xossalari.* AK1 va AK2 aktivlangan ko'mirlarining xossalari 1-jadvalda keltirilgan. Jadvaldan ko'rinib turibdiki, AK1 ning solishtirma sirt maydoni (1383 m²/g) AK2 nikiga (930 m²/g) nisbatan yuqori. Biroq AK1 ning g'ovak hajmi, o'rtAKha g'ovak diametri va kislotali funksional guruhlari miqdori (mos ravishda 0,10 mL/g, 3,0 Å va 0,96 mmol/g) AK2 ga qaraganda kichikroq bo'ldi (AK2 uchun 0,15 mL/g, 6,5 Å va 1,24 mmol/g). Ushbu farqlar ko'mirning kelib chiqish manbai — toshko'mir yoki kokos po'stlog'iga bog'liq ekanligi bilan izohlanadi.

1-jadval.

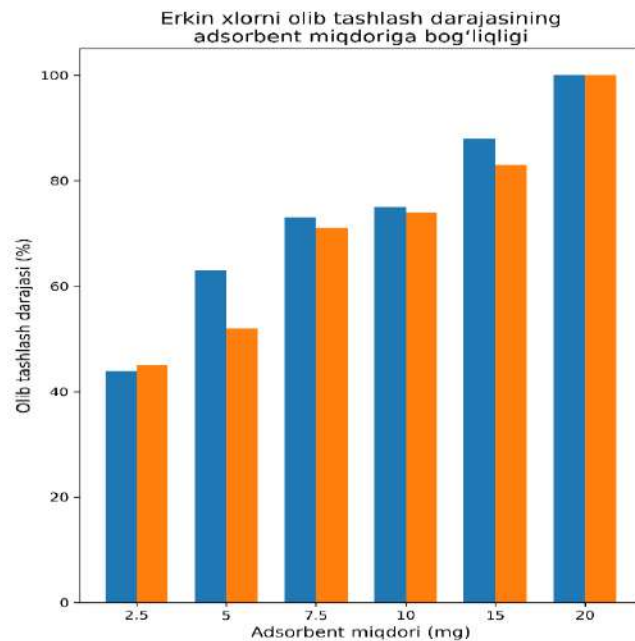
Aktivlangan ko'mir(AK1 va AK2)larning xossalari

Namuna	Solishtirma sirt maydoni, (m ² /g)	G'ovak hajmi ml/g			O'rtacha g'ovak diametri, Å	Kislotali funksional guruhlari (mmol/g)				Asosiy funksional guruhlari, mmol/g	pH
		(r ≤ 20 Å)	(20 < r ≤ 500 Å)	Umumiy g'ovak hajmi		Yig'indi	Fenolik guruhlari,	Lakton guruhlari,	Karboksil guruhlari,		
AK1 (toshko'mir asosida)	1383	0.06	0.04	0.10	3.0	0.96	0.15	0.02	0.79	0.45	6.1
AK2 (kokos po'stlog'idan)	930	0.07	0.08	0.15	6.5	1.24	0.00	0.28	0.96	0.28	7.2

Erkin qoldiq modda yani xlorni aktivlangan ko'mir yordamida olib tashlash. 1-rasmdan ko'rinib turibdiki, vaqt o'tishi bilan aktivlangan ko'mir yordamida erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash darajasi ortib bordi. 8 soat ichida erkin qoldiq modda yani xlarning to'liq olib tashlanishi kuzatildi. Adsorbent miqdorining ta'siri 2-rasmda keltirilgan. AK1 yordamida erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash darajasi 44–89 % oralig'ida, AK2 da esa 44–76 % oralig'ida bo'ldi.

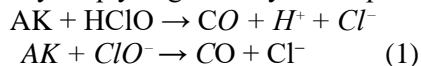


1-rasm. Vaqt o'tishi bilan erkin qoldiq xlorning olib tashlanish darajasi (%) ortib borishi.



2- rasm. Erkin qoldiq xlorni olib tashlash samaradorligiga adsorbent dozasi ta'siri

Suvdagi gipoxlorit kislota (HClO) va gipoxlorit ionining (ClO⁻) nisbatlari asosan pH qiymatiga, kamroq darajada esa haroratga bog'liq. Aktivlangan ko'mir yordamida dextrorizatsiya jarayoni organik moddalarni adsorbtsiyalashdan farq qiladi. Bu jarayon adsorbtsiya emas, balki kimyoviy reaksiya bo'lib, unda aktivlangan ko'mir yuzasi xlor tomonidan oksidlanadi. Jarayon quyidagi reaksiyalar orqali ifodalanadi:

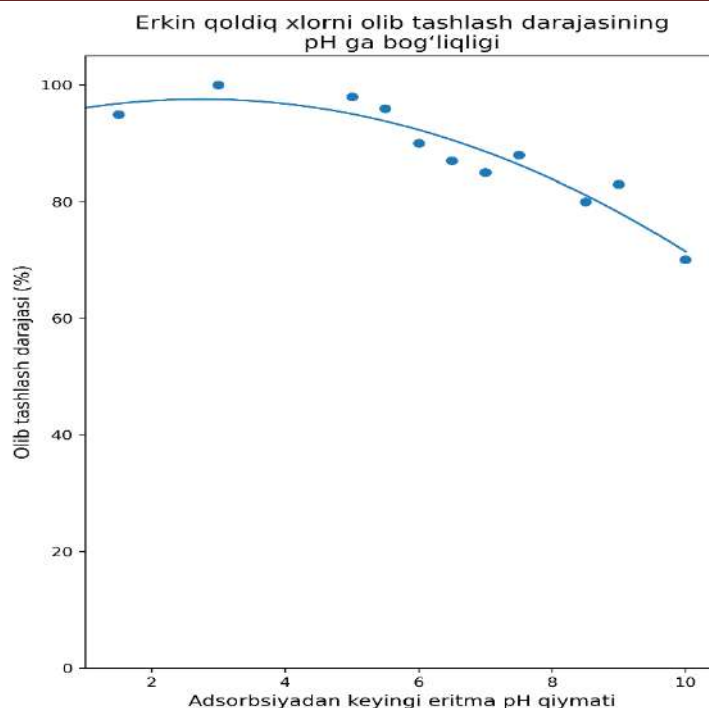


(bu yerda C* — aktivlangan ko'mir yuzasidagi faol markazni bildiradi).

Mazkur tadqiqotda ham shunga o'xshash hodisalar kuzatildi. 3-rasmda ko'rsatilishicha, pH = 3 sharoitida erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash eng yuqori samaradorlikka (99,6 %) ega bo'ldi. Bu natija ilgari chop etilgan tadqiqotlar bilan mos keladi. Ishqoriy muhitda erkin xlor asosan ClO⁻ shaklida bo'ladi, pH pasayishi bilan esa HClO molekulyar shaklining ulushi ortadi.

Aktivlangan ko'mir yordamida kran suvidagi erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash. Istimol suvidagi erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash samaradorligi hamda nitrat, nitrit va ftorid ionlari konsentratsiyasining o'zgarishi 2-jadvalda keltirilgan. Jadvaldan ko'rinib turibdiki, AK1 murakkab tarkibli tizim bo'lgan kran suvida ham erkin qoldiq modda yani xlorni samarali tarzda olib tashladi.

Adsorbent miqdori oshishi bilan nitrat ionlari konsentratsiyasi kamaydi, bu esa jarayonning adsorbtsiya mexanizmi orqali sodir bo'layotganini ko'rsatadi. Aktivlangan ko'mir bilan ishlov berilgandan so'ng nitrit va ftorid ionlari aniqlash chegarasidan past bo'ldi. Ma'lumki, organik moddalar aktivlangan ko'mir yuzasidagi dextrorizatsiya uchun faol markazlarni band qilib, jarayon samaradorligini pasaytirishi mumkin. Shunga qaramay, kran suvi tarkibida organik moddalar hamda ko'plab anion va kationlar mavjud bo'lishiga qaramasdan, AK1 erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlashda yuqori samaradorlikni namoyon etdi [6,8]. Kran suvidagi erkin qoldiq xlorni olib tashlash jarayonini baholashda mahalliy sharoitlar va suv tarkibining xususiyatlari inobatga olindi. Ushbu yondashuv O'zbekiston hududidagi suv tozalash texnologiyalariga bag'ishlangan adabiyotlarda keltirilgan metodik tavsiyalar bilan mos keladi [9,10].



3-rasm. Turli pH sharoitlarida AK1 yordamida erkin qoldiq xlori olib tashlash jarayonini baholash

2-jadval.

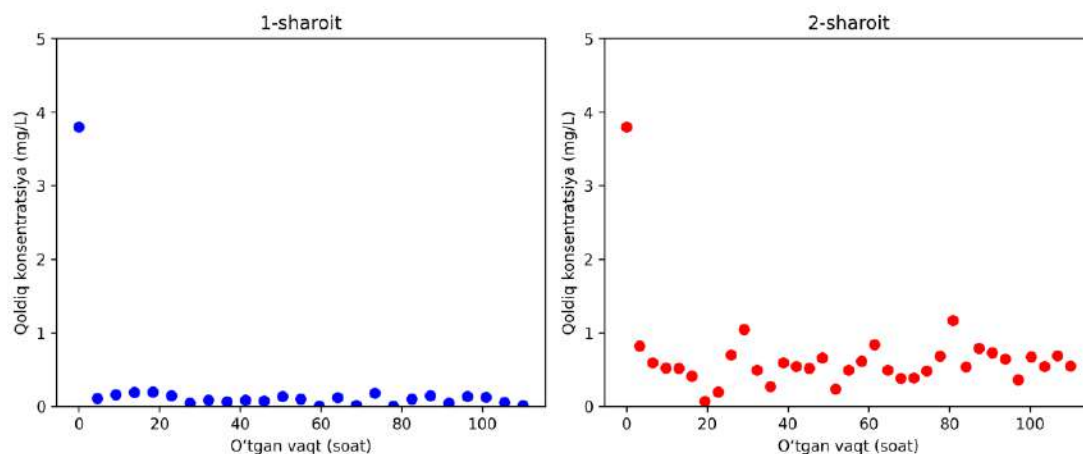
Suvda erkin qoldiq xlori olib tashlashdan oldin va keyin konsentratsiyalarning o'zgarishi

Adsorbent og'irligi (mg)	Erkin qoldiq xlori olib tashlash foizi (%)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	F^- (mg/l)
0	—	4.57	AD	AD
3	50	4.74	AD	AD
5	71	4.58	AD	AD
8	80	4.33	AD	AD
10	88	4.31	AD	AD
15	95	4.18	AD	AD
20	96	4.12	AD	AD

Izoh: Aniqlanmadi (N.D.) — aniqlash chegarasidan past (detektor tomonidan qayd etilmagan).

Erkin qoldiq modda yani xlori olib tashlashda “breakthrough” egri chizig'i. “To'yinish nuqtasi” egri chizig'i adsorbsion kolonna usulida adsorbentning adsorbsion sig'imini baholash imkonini beradi. Ushbu noteks chiziq chiqish oqimidagi konsentratsiyaning vaqt bo'yicha o'zgarishini ko'rsatib, kolonaning optimal ish sharoitlarini va maksimal adsorbsiya sig'imini aniqlashga yordam beradi

AK1 yordamida olingan erkin qoldiq modda yani xlorning “to'yinish nuqtasi” noteks chizig'i 4-rasmda keltirilgan. 1-sharoitda erkin qoldiq modda yani xlori olib tashlash qobiliyati 120 soatdan ko'proq vaqt davomida saqlanib qoldi. 2-sharoitda esa erkin qoldiq modda yani xlor kolonka chiqishida taxminan 30 soatdan so'ng aniqlana boshladi. Ushbu natijalar kolonka usulida erkin qoldiq modda yani xlori olib tashlash uchun eng maqbul sharoitlar **FT = 306 soat⁻¹** va **CHT = 6,1 m/soat** ekanligini ko'rsatdi. Mazkur tadqiqot doirasida ko'rib chiqilgan amaliy sharoitlarda FT odatda 1–100 soat⁻¹ oralig'ida bo'lib, bu sharoitlarda AK1 yuqori samaradorlik ko'rsatdi.



4-rasm. Aktivlangan ko‘mir bilan ishlov berish (AKT) jarayonida erkin qoldiq xlorning breakthrough egri chiziqlarini tahlil qilish

Xulosa. Ushbu tadqiqotda aktivlangan ko‘mir yordamida suvdagi erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash jarayoni o‘rganildi. Aktivlangan ko‘mirlar toshko‘mir asosida olingan (AK1) va kokos po‘stlog‘idan tayyorlangan (AK2) turlardan iborat bo‘ldi. Tajriba natijalari shuni ko‘rsatdiki, vaqt o‘tishi bilan erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash darajasi oshib bordi va 8 soatdan ko‘proq vaqt ichida aktivlangan ko‘mir yordamida erkin qoldiq modda yani xlor to‘liq olib tashlandi. Shuningdek, adsorbent miqdori ortishi bilan erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash samaradorligi ham oshdi.

Mazkur tadqiqot natijalari aktivlangan ko‘mir yordamida suvdagi erkin qoldiq xlorni samarali tarzda olib tashlash mumkinligini ko‘rsatdi. Olingan xulosalar mahalliy ilmiy manbalarda keltirilgan natijalar bilan hamohang bo‘lib, O‘zbekiston sharoitida adsorbtsion kolonna usulini amaliyotga joriy etish imkoniyatini tasdiqlaydi [9–11].

Erkin qoldiq modda yani xlorni aktivlangan ko‘mir yordamida olib tashlash mexanizmi gipoxlorit kislotasi yoki gipoxlorit ionining aktivlangan ko‘mir yuzasidagi faol markazlar bilan reaksiyaga kirishishi orqali amalga oshadigan dextrorizatsiya jarayoni ekanligi aniqlandi. Bundan tashqari, AK1 aktivlangan ko‘miri kran suvidagi erkin qoldiq modda yani xlorni samarali tarzda kamaytirishda foydali ekanligi ko‘rsatildi. Kolonka usulida erkin qoldiq modda yani xlorni olib tashlash uchun optimal sharoitlar $FT = 306 \text{ soat}^{-1}$ va $CHT = 6,1 \text{ m/soat}$ ekanligi aniqlandi.

ADABIYOTLAR:

1. Manahan A. E. *Environmental Chemistry*, 5th ed. Lewis Publishers, Michigan, pp. 209–210, 1991.
2. AdAKhi A.; Kimata S.; Noguchi M.; Okano, T. *Decomposition of monochloramine in water by rice bran*. // *Journal of Health Science*, 48(2), 126–129, 2002.
3. Asada T.; Okazaki A.; Kawata K.; Oikawa, K. *Effects of pore characteristics and solution pH on the removal of free and combined chlorine by porous carbon*. // *Journal of Health Science*, 55(4), 649–656, 2009.
4. Jaguaribe E. F.; Medeiros L. L.; Barreto M. C. S.; Araujo L. P. *The performance of activated carbons from sugarcane bagasse, babassu, and coconut shells in removing residual chlorine*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22(1), 41–47, 2005.
5. Potwora R. *Removing chlorine and chloramines with activated carbon*. *Water Conditioning & Purification*, June issue, 2009.
6. Nasser R.; Jassim A. A.; Xi-Wu, L.; Abualhail, S. *Prediction and modeling of breakthrough behavior of residual chlorine removal by granular activated carbon adsorber using artificial neural networks*. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(13), 1883–1887, 2012.
7. Boehm H. P. *Chemical identification of surface groups*. *Advances in Catalysis*, 16, 179–274, 1966.

CHEMISTRY

8. Suidan M. T.; Snoeyink V. L.; Schmitz, R. A. Reduction of aqueous free chlorine with granular AKtivated carbon: Effects of pH and temperature. *Environmental Science & Technology*, 11(8), 785–789, 1977.
9. Rashidova N. R.; Turaev B. T. *Suvni tozalash va oqova suvlarni qayta ishlash texnologiyalari*. Toshkent: Fan va texnologiya, 2016.
10. Ahmedova M. X.; Islomov S. A. *Atrof-muhitni muhofaza qilish va suv resurklarini tozalash asoslari*. Toshkent: O'zbekiston Milliy universiteti nashriyoti, 2018.
11. Abdullayev A. M.; Qodirov U. T. AKtivated carbon adsorption of harmful substances from water media. *O'zbekiston kimyo jurnali*, No. 3, pp. 45–50, 2020.

**DEHQONOBOD KALIY ZAVODIDA SILVINIT FLOTATSIYASIDA HOSIL BO'LADIGAN
SHLAMNING SAMARADORLIKKA TA'SIRI**

Raximov Alisher Xudoyberdi o'g'li,

Qarshi davlat texnika universiteti

Oziq-ovqat mahsulotlar texnologiyasi kafedrasida katta o'qituvchisi

alisherrakhimov35@gmail.com

Murodov Davrbek Dilshodjon o'g'li,

Qarshi davlat texnika universiteti

Oziq-ovqat mahsulotlar texnologiyasi kafedrasida talabasi

Murodovdavrbek84@gmail.com

Xurramov Dilnurbek Jamil o'g'li,

Qarshi davlat texnika universiteti

Oziq-ovqat mahsulotlar texnologiyasi kafedrasida talabasi

Dilnurbekxurramov113@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu tadqiqotda “Dehqonobod kaliy zavodi”ning I va II bosqichlarida silvinit rudasini flotatsiya usulini qo'llab qayta ishlash paytida paydol bo'ladigan shlamning miqdoriy-sifat ko'rsatkichlari ilmiy baholandi. Silvinit tarkibidagi suvda erimaydigan qismining 3,25% bo'lishi natijasida I bosqichda 1 soatga 30,482 t, II bosqichda esa 60,965 t shlam shakllanishi aniqlangan. Mineralogik tarkib tahlili shlamda 13,69% KCl, 48,7% NaCl, 36,4% erimaydigan qoldiq va 1,8% CaSO₄ mavjudligini ko'rsatdi. Ushbu komponentlarning taqsimlanishi flotatsiya samaradorligi, KCl yo'qotilishining darajasi hamda qayta aylanma rassolning sifatiga bilinarli ta'sir ko'rsatadi: I bosqichda 25,719 t, II bosqichda 51,439 t rassol qayta ishlab chiqarish jarayoniga beriladi.

Olingan ko'rsatkichlar asosida shlam hosil bo'lishi bo'yicha mass-balanstik baho, flotatsiyadagi texnologik yo'qotishlar hamda jarayonning umumiy samaradorligiga ta'sir etuvchi omillar aniqlanib, ishlab chiqarish jarayonini optimallashtirish bo'yicha ilmiy xulosalar ishlab chiqildi.

Kalit so'zlar: silvinit, flotatsiya, KCl, rassol, mass-balanstik tahlil, kaliy xlorid.

**ВЛИЯНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ШЛАМА ПРИ ФЛОТАЦИИ СИЛЬВИНИТА НА
ПРОИЗВОДСТВЕННУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕХКАНАБАДСКОГО КАЛИЙНОГО ЗАВОДА**

Аннотация. В данном исследовании научно оценены количественные и качественные показатели шлама, образующегося в процессе флотационной переработки сильвинитовой руды на I и II стадиях «Дехканабадского калийного завода». Установлено, что при содержании нерастворимого остатка 3,25% в сильвините на I стадии формируется 30,482 т/ч шлама, а на II стадии — 60,965 т/ч. Минералого-химический анализ показал, что шлам содержит 13,69% KCl, 48,7% NaCl, 36,4% нерастворимого остатка и 1,8% CaSO₄. Распределение данных компонентов оказывает существенное влияние на эффективность флотации, уровень потерь KCl и качество циркулирующего рассола: на I стадии в технологический цикл возвращается 25,719 т рассола, на II стадии — 51,439 т.

На основе полученных данных выполнена масс-балансовая оценка образования шлама, определены технологические потери в процессе флотации, а также выявлены ключевые факторы, влияющие на общую эффективность производства. Разработаны научные рекомендации по оптимизации технологического процесса.

Ключевые слова: сильвинит, флотация, хлорид калия (KCl), рассол, массо-балансовый анализ, хлорид калия.

**IMPACT OF SLIME FORMATION DURING SYLVINITE FLOTATION ON PRODUCTION
EFFICIENCY AT THE DEHQONOBOD POTASH PLANT**

Abstract. This study provides a scientific assessment of the quantitative and qualitative characteristics of the sludge generated during the flotation processing of sylvinit ore at the first and second stages of the “Dehqonobod Potash Plant.” With a 3.25% content of insoluble residue in the ore, sludge formation was determined to be 30.482 t/h at Stage I and 60.965 t/h at Stage II. Mineralogical analysis revealed that the sludge

contains 13.69% KCl, 48.7% NaCl, 36.4% insoluble residue, and 1.8% CaSO₄. The distribution of these components significantly affects flotation efficiency, the extent of KCl losses, and the quality of the recirculating brine: 25.719 t of brine is returned to the process at Stage I, and 51.439 t at Stage II.

Based on the obtained results, a mass-balance assessment of sludge formation was conducted, technological losses during flotation were quantified, and key factors influencing the overall process efficiency were identified. Scientific recommendations for optimizing the production process were developed.

Keywords: sylvinit, flotation, potassium chloride (KCl), brine, mass balance analysis, potassium chloride.

Kirish. Kaliy xlorid ishlab chiqarish samaradorligi silvinit rudasining mineral tarkibi, suvda erimaydigan qoldiq miqdori va flotatsiya jarayonining fizik-kimyoviy xususiyatlariga bog‘liq. Rudadagi 3,25% erimaydigan faza “Dehqonobod kaliy zavodi”da shlam hosil bo‘lishini kuchaytirib, I bosqichda 30,482 t/soat, II bosqichda 60,965 t/soat shlam shakllanishiga olib keladi. Shlam tarkibidagi 13,69% KCl texnologik yo‘qotishlarni, NaCl va erimaydigan qoldiqning yuqori ulushi esa flotatsiya selektivligining pasayishini aks ettiradi.

Qayta aylanma rassolning I bosqichda 25,719 t, II bosqichda 51,439 t bo‘lishi ion kuchi va zichlikning o‘zgarishi orqali jarayon samaradorligiga ta‘sir qiladi. Shlam miqdori va tarkibidagi farqlanish ishlab chiqarish jarayonini optimallashtirish zarurligini ko‘rsatadi. Shu sababli shlamning miqdoriy-sifat ko‘rsatkichlarini tahlil qilish barqaror va samarali KCl ishlab chiqarish texnologiyasini shakllantirishda muhim ahamiyatga ega.

Nazariy qism. Silvinitni flotatsiya orqali boyitish KCl ishlab chiqarishning asosiy texnologik jarayonidir. KCl va NaClning fizik-kimyoviy farqlari selektiv ajratishni ta‘minlaydi, ammo 3–4% erimaydigan qoldiq muhit dispersiyasini oshirib, kollektor adsorbsiyasini susaytiradi va KClning loy bilan qoplanishi orqali yo‘qotishlarni kuchaytiradi.

Flotatsiya mashinasidagi aralashtirish rejimi, pufakchalar dispersiyasi va qattiq yuklama shlam granulometrik tarkibini belgilaydi. Loyqa fazaning ortishi ko‘pik barqarorligini pasaytirib, KCl ajralish samaradorligini cheklaydi. Shlam tarkibida 13–14% KCl, 48–50% NaCl va 35–37% erimaydigan qoldiq differensial namlanish mexanizmining buzilayotganini ko‘rsatadi. NaClning yuqori ulushi rassolning ion kuchini oshiradi; 1–2% CaSO₄ texnologik uskunalarda qotishma hosil qilish xavfini kuchaytiradi.

Tadqiqot metodologiyasi. Tadqiqot jarayonida “Dehqonobod kaliy zavodi” I va II bosqichlaridan olingan silvinit flotatsiya shlamlarining miqdoriy-sifat ko‘rsatkichlari laboratoriya sharoitida eksperimental ravishda o‘rganildi. Har ikki bosqichdan olingan namunalarning fizik-kimyoviy tarkibi, qattiq–suyuqlik nisbatlari, mineralogik xususiyatlari hamda KCl yo‘qotilishining mass-balanstik bahosi aniqlandi. Tadqiqot quyidagi metodlar asosida olib borildi:

1. Namuna olish va tayyorlash

Shlam namunalarini olish jarayoni zavodning flotatsiya quyruq chiqarish nuqtasida amalga oshirildi. Har bir bosqichdan 10 kg dan iborat uch martalik takror (replikat) namunalar olindi. Namuna bir xillash masalasi (homogenizatsiya) kvartaj usulida bajarilib, umumiy namunadan:

- 500 g – fizik-kimyoviy tahlil uchun,
- 250 g – qattiq modda ulushini aniqlash uchun,
- 250 g – KCl va NaCl miqdorini aniq analitik o‘lchov uchun ajratildi.

Namuna 105 °C da 2 soat davomida quritilib, 0,5 mm elakdan o‘tkazildi.

2. Shlamning qattiq modda ulushini aniqlash

Qattiq moddaning massaviy miqdori gravimetrik usulda o‘lchandi.

Jarayon:

- Farfor tigel 550 °C da kuydirilib, eksikatorida sovitildi.
- Tigelga 50 g aralashtirilgan shlam solinib, 105 °C da 3 soat quritildi.
- Quritilgan namuna tortildi va qattiq faza ulushi quyidagi formula asosida hisoblandi:

$$W_{\text{qattiq}} = \frac{m_{\text{quyruq}}}{m_{\text{boshlang'ich}}} \times 100\% \quad (1)$$

Natija:

I bosqich shlamida qattiq faza ulushi 15,64%,

II bosqichda 15,62% deb aniqlandi.

Bu ko‘rsatkich zavodning texnologik ma‘lumotlariga mos keldi.

3. Eritmada KCl va NaCl konsentratsiyasini aniqlash

KCl va NaCl miqdori argentometriya (Mohr usuli) va ion-xromatografiya orqali tekshirildi.

3.1 Mohr usuli bilan xlorid ionlarini titrlash

- 10 ml filtrlangan rassol eritmasi 100 ml kolbaga suyultirildi.
 - 1 ml 5% K₂CrO₄ indikator qo‘shildi.
 - 0,1 N AgNO₃ eritmasi bilan titrlandi.
 - Kulrangdan qizg‘ish jigarrang rangning paydo bo‘lishi ekvivalent nuqta sifatida olindi.
- Cl⁻ miqdori quyidagicha hisoblandi:

$$Cl^- = \frac{V_{AgNO_3} \cdot N \cdot 35.45}{V_{namuna}} \quad (2)$$

4. Shlamdagi KCl ulushini aniqlash

KCl miqdori ion-xromatografik analiz yordamida aniqlandi.

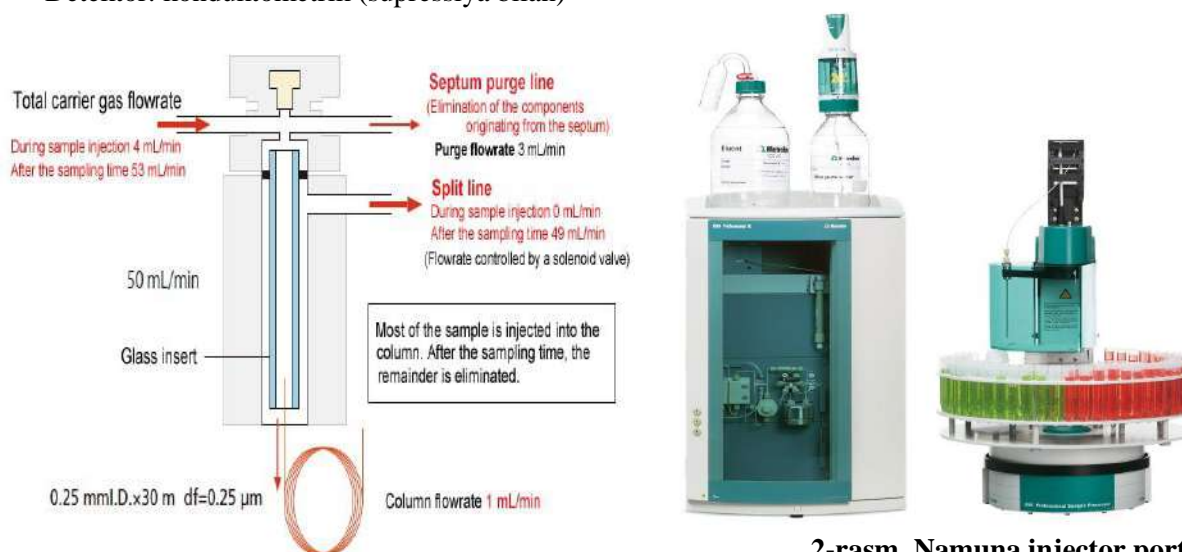


1-rasm. Ion-xromatograf qurilmasining umumiy laboratoriya ko‘rinishi

Asbob: Dionex ICS-6000 ion-xromatograf

Shartlar:

- Kolonka: AS-14
- Eluent: Na₂CO₃/NaHCO₃ (3,5/1,0 mM)
- Sarf: 1 ml/min
- Detektor: konduktometrik (supressiya bilan)



2-rasm. Namuna injector portga yuborilayotgan jarayon

O‘lchov natijasi:

Shlam tarkibidagi KCl miqdori o'rtacha $13,69 \pm 0,15\%$ ni tashkil etdi.

5. Mineral tarkibni aniqlash (XRD va SEM tahlili)

Shlamning fazaviy tarkibi rentgen difraksiyasi (XRD) usuli bilan aniqlangan.

Asbob: PANalytical X'Pert PRO

Natijalar:

– Sylvite (KCl) piklari: $2\theta = 28,3^\circ, 40,6^\circ$

– Halite (NaCl) piklari: $31,7^\circ, 45,5^\circ$

– Anhidrit/CaSO₄ piklari: $25,6^\circ, 29,0^\circ$

– Loy minerallari: SiO₂ (kvars) piklari $26,6^\circ$ atrofida

SEM mikrotasvirlar shlamning mayda dispersli (10–80 μm) zarrachalardan iborat ekanini ko'rsatdi.

6. Rassol zichligi va ion kuchi o'lchovi

Rassolning zichligi gidrometr yordamida aniqlanib:

– I bosqich rassoli: $1,182 \text{ g/cm}^3$

– II bosqich rassoli: $1,196 \text{ g/cm}^3$

Ion kuchi quyidagi formula asosida hisoblandi:

$$I = \frac{1}{2} \sum c_i z_i^2 \quad (3)$$

Bu qiymat flotatsiya jarayonida ion faolligi va kollektor adsorbsiyasiga bevosita ta'sir etishi sababli keyingi tahlillarda ishlatildi.

7. Shlamdan KCl yo'qotilishini hisoblash

KCl yo'qotilishi quyidagicha aniqlangan:

$$Q_{\text{yo'qotish}} = W_{\text{shlam}} \cdot W_{\text{KCl}} \quad (4)$$

I bosqich: $30,482 \text{ t/soat} \times 13,69\% = 4,17 \text{ t/soat KCl yo'qotish}$

II bosqich: $60,965 \text{ t/soat} \times 13,69\% = 8,34 \text{ t/soat KCl yo'qotish}$

Bu yiliga 100 ming tonnadan ortiq yo'qotishlar berishi mumkinligini ko'rsatadi.

Metodikaning ilmiy ahamiyati. Laboratoriya sharoitida o'tkazilgan ushbu kompleks tahlillar shlam hosil bo'lishining minerallogik, fizik-kimyoviy va gidrodinamik mexanizmlarini aniqlashga, KCl yo'qotishlarining miqdoriy bahosini olishga hamda flotatsiya jarayonini optimallashtirish uchun zarur bo'lgan asosiy parametrlarni aniqlashga imkon berdi.

Tadqiqot davomida I va II bosqich flotatsiya shlamlarining fizik-kimyoviy, minerallogik va texnologik ko'rsatkichlari laboratoriya sharoitida o'lchandi hamda o'zaro taqqoslab tahlil qilindi. Eksperimental natijalar shlam hosil bo'lish mexanizmi, KCl yo'qotilishining sabablari va rassolning texnologik sifatidagi farqlarni aniqlash imkonini berdi.

1. Shlamning qattiq faza ulushi va tarkibiy o'zgarishi

Gravimetrik usulda aniqlangan qattiq modda miqdori ikki bosqich uchun deyarli bir xil bo'lib:

– I bosqich: $15,64\%$

– II bosqich: $15,62\%$

Bu natija ruda sifatidagi farqlanish minimal ekanini ko'rsatadi, ammo shlam miqdori ikki baravarga oshgani tufayli umumiy qattiq faza chiqindisi sezilarli darajada ortadi. Shlamning granulometrik tarkibi SEM mikrofotosuratlarida 10–80 μm diapazondagi mayda dispersli zarrachalardan iborat ekanini aniqlandi, bu esa flotatsiya jarayonida zarrachalarning ko'pik fazasiga chiqishini qiyinlashtiradi.

2. KCl va NaClning miqdoriy taqsimlanishi

Ion-xromatografik tahlil natijalari shlam tarkibida sezilarli miqdorda qimmatli mineral – KCl saqlanib qolayotganini ko'rsatdi:

– KCl: $13,69 \pm 0,15\%$

– NaCl: $48,7\%$

– Erimaydigan qoldiq: $36,4\%$

– CaSO₄: $1,8\%$

Muhokama. KClning 13–14% bo'lishi flotatsiya jarayonidan to'liq ajralmayotganligini bildiradi. Bu quyidagi omillar bilan izohlanadi:

1. Loy minerallari KCl sirtini qoplab, kollektor adsorbsiyasiga to'sqinlik qilmoqda.

2. NaClning yuqori ulushi rassolning ion kuchini oshirib, KCl–pufakcha yopishish tezligini pasaytirmoqda.

3. Erimaydigan qoldiqning ko‘pligi aralashtirish zonalarida “mexanik tiqilish” effektini yuzaga keltirmoqda.

3. Rassol zichligi va ion kuchi o‘zgarishi

O‘lchov natijalariga ko‘ra:

– I bosqich rassoli zichligi: 1,182 g/cm³

– II bosqich rassoli zichligi: 1,196 g/cm³

Ion kuchining ortishi flotatsiya jarayoniga quyidagicha ta’sir qiladi:

– pufakchalar ko‘tarilish tezligi pasayadi;

– kollektor molekularining KCl sirtiga adsorbsiyasi kamayadi;

– KCl selektivligi susayadi.

Bu texnologik muvozanatning buzilishiga olib kelib, II bosqichda shlam tarkibida KCl yo‘qotilishi yuqoriroq bo‘lishi kuzatildi.

4. KCl yo‘qotilishining mass-balanstik bahosi

Hisob-kitoblarga ko‘ra KCl yo‘qotilishi quyidagicha bo‘lgan:

I bosqich: 30,482 t/soat × 13,69 % = 4,17 t/soat KCl yo‘qotish

II bosqich: 60,965 t/soat × 13,69 % = 8,34 t/soat KCl yo‘qotish

Yillik yo‘qotish: (4,17 + 8,34) × 8000 soat ≈ 100 080 tonna/yil KCl yo‘qotish

Muhokama: Bu ko‘rsatkich ishlab chiqarish samaradorligi uchun juda sezilarli bo‘lib, yillik KCl ishlab chiqarishning 15–18% gacha yo‘qotilayotganini ko‘rsatadi. Bunday yo‘qotishlar flotatsiya jarayonida optimallashtirish zarurligini aniq ko‘rsatadi.

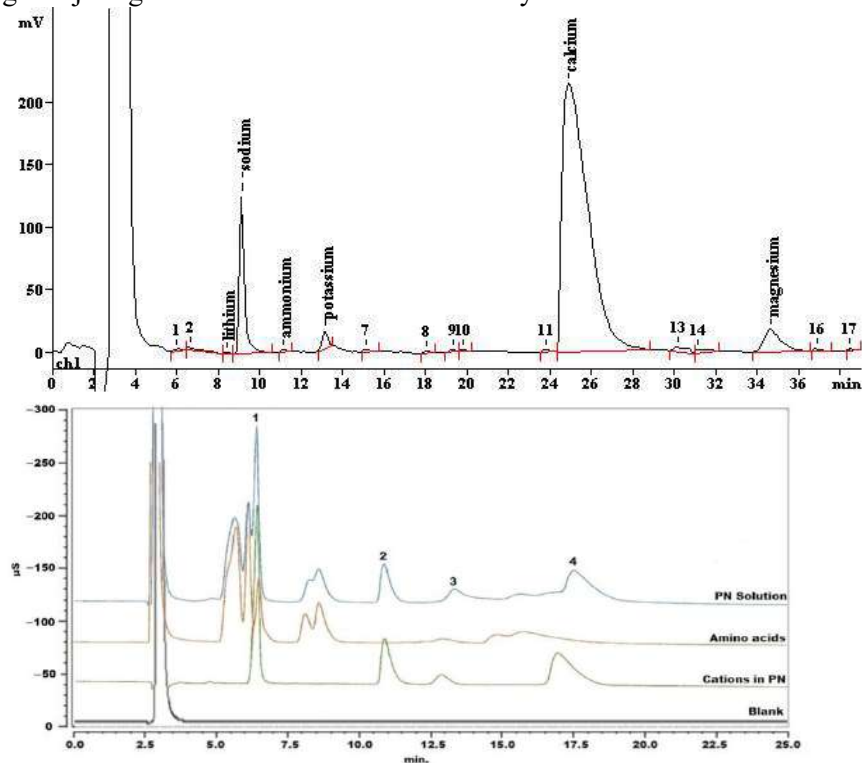
XRD difraktogrammalar:

4. XRD tahlil natijalari

– KCl piki (28,3°) intensivligi pastlashgan – KClning loy bilan qoplanishini bildiradi.

– NaCl piklari kuchli (31,7° va 45,5°) – NaClning ustunligini tasdiqlaydi.

– CaSO₄ piklarining mavjudligi cho‘kma hosil bo‘lish tendensiyasini ko‘rsatadi.



3-rasm. Xromatograf monitorida natija (xromatogramma piki)

Muhokama: CaSO₄ ning mavjudligi ishlab chiqarish tizimida qotishmalar, inkrustatsiyalar hosil bo‘lishi xavfini oshiradi.

6. Umumiy texnologik tahlil

Natijalar shuni ko'rsatadiki:

I bosqich:

- Shlamdan olingan rassol sifati barqarorroq
- KCl yo'qotilishi kamroq
- Loy miqdori nisbatan past

II bosqich:

- Ruda hajmi katta, aralashtirish zonolari ortiqcha yuklangan
- Ion kuchi yuqori → KCl selektivligi pasaygan
- KCl yo'qotilishi ikki baravar yuqori
- Shlam miqdori tez ko'paymoqda

Demak, II bosqich flotatsiya tizimi qo'shimcha optimizatsiyani talab qiladi.

Xulosa. Tadqiqot natijalari shlam tarkibi va miqdori flotatsiya samaradorligiga bevosita ta'sir ko'rsatishini ko'rsatdi. Rudadagi 3,25% erimaydigan qoldiq I bosqichda 30,482 t/soat, II bosqichda 60,965 t/soat shlam hosil bo'lishiga olib keldi. Shlam tarkibida 13,69% KClning saqlanib qolishi flotatsiyada mineralning to'liq ajralmayotganini tasdiqladi. Ion-xromatografiya, gravimetriya va XRD tahlillari NaCl, KCl, erimaydigan qoldiq va CaSO₄ning jarayon selektivligiga salbiy ta'sirini aniqladi. Rassol zichligining 1,182 dan 1,196 g/cm³ gacha oshishi ion kuchining ortishiga va KCl ajralishining pasayishiga sabab bo'ldi. KCl yo'qotilishi I bosqichda 4,17 t/soat, II bosqichda 8,34 t/soat bo'lib, yillik yo'qotish 100 ming tonnadan oshadi. Bu flotatsiya tizimini optimallashtirish va qo'shimcha qayta flotatsiya bosqichlarini joriy etish zarurligini ko'rsatadi.

ADABIYOTLAR:

1. Boboxonova Z. *Silvinit rudalaridan kaliy xloridni ajratib olishda flotatsion jarayon parametrlarining ta'siri*. // *Universal jurnal*, 2025. URL: <https://inlibrary.uz/index.php/universal/article/view/25836>
2. *Kaliy xloridni silvinitlardan flotatsiya usulida ajratib olish*. // *Universal ilmiy jurnal*, 2024. URL: <https://inlibrary.uz/index.php/universal/article/view/26668>
3. Oripov A.A. *Silvinitli rudalardan kaliy xlorid ishlab chiqarish*. // *Лучшие интеллектуальные исследования*, 2024, 3(23): 48–55. URL: <https://inlibrary.uz/index.php/lir/article/view/26121>
4. G'aybnazarov S.B., Ismailov A.S., Maxmudov D.R. "Dehqonobod kaliy zavodi" AJ TeraQo'ton kon majmuasida H₂B qatlamini qazib olishda nobudgarchilikni kamaytirish. // *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 2023, 1(1): 23–32. URL: <https://inlibrary.uz/index.php/tech/article/view/23314>
5. Maxmudov D.R., Ismailov A.S., Olimov F.M. "Dehqonobod kaliy zavodi" konida nobudgarchilik ko'rsatkichlari. // *Ilmiy maqolalar to'plami*, 2022. URL: <https://inlibrary.uz/index.php/lir/article/view/26120>
6. *Silvinit rudasidan hosil bo'ladigan shlamlardan kompleks o'g'it olish texnologiyasi*. // *Лучшие интеллектуальные исследования*, 2024, 3(23): 464–470. URL: <https://inlibrary.uz/index.php/lir/article/view/26467>
7. Wang Y., et al. *Influence of electrolyte ions on collector adsorption in flotation systems*. // *Surface Science Reports*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2018.04.001>
8. Wills, B. A., Finch, J. A. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 8th Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2016. <https://www.sciencedirect.com/book/9780080970530>
9. Bulut, G., Hiçyılmaz, C. *Potash recovery from silvinit ores by flotation*. // *Minerals Engineering*, Vol. 20, Issue 6, 2007, pp. 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.10.015>
10. Gupta, A., Yan, D. S. *Mineral Processing Design and Operations: An Introduction*. Elsevier, 2016. <https://www.sciencedirect.com/book/9780124055990>

SQLDA MA'LUMOTLARNI FILTRLASHDA FUNKSIYALARDAN FOYDALANISH SAMARADORLIGI

*Toshpo'latova Shahnozabonu Bobomurodovna,
Buxoro davlat universiteti talabasi
shahnozatoshpulatova982@gmail.com*

Annotatsiya. Ushbu maqolada SQL tizimida ma'lumotlarni filtrlash jarayonida funksiyalardan foydalanishning ahamiyati va samaradorligi yoritilgan. Ma'lumotlar bazasi bilan ishlashda filtrlar yordamida kerakli yozuvlarni tanlab olish jarayoni muhim bosqichlardan biri bo'lib, funksiyalar qo'llanilganda ushbu jarayon yanada qulay, aniq va tezkor bo'ladi. Matn, son va sana bilan bog'liq funksiyalarning filtrlashdagi roli, ularning amaliy qo'llanilishi hamda foydalanuvchiga taqdim etadigan ustunliklari batafsil ko'rib chiqiladi. Shuningdek, katta hajmdagi ma'lumotlarni qayta ishlashda funksiyalardan foydalanish natijasida tizim samaradorligining oshishi, qidiruv mezonlarining moslashuvchanligi va tahlil jarayonlarining optimallasuvi haqida ham fikr yuritiladi. Maqolada funksional yondashuvning real amaliyotdagi afzalliklari, uni qo'llash misollari va ma'lumotlar bilan ishlash sifati qanday yaxshilanishi chuqur tahlil etilgan. Ushbu annotatsiya mavzuning mazmunini qisqa va izchil yoritib, maqolaning nazariy-amaliy qiymatini aks ettiradi.

Kalit so'zlar: SQL, ma'lumotlarni filtrlash, funksiyalar, agregat funksiyalar, matn funksiyalari, sana funksiyalari, ma'lumotlar bazasi, optimallashtirish, qidiruv samaradorligi, SELECT operatori, LIKE operatori, UPPER(), LOWER(), COUNT(), SUM(), ma'lumotlarni qayta ishlash.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФУНКЦИЙ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ДАННЫХ В SQL

Аннотация. В данной статье рассматривается значение и эффективность использования функций при фильтрации данных в системе SQL. Процесс отбора необходимых записей является одним из ключевых этапов работы с базами данных, и применение функций делает этот процесс более удобным, точным и оперативным. Подробно анализируется роль текстовых, числовых и датных функций в фильтрации, их практическое применение и преимущества для пользователей. Также рассматривается повышение производительности системы при обработке больших объемов данных, гибкость условий поиска и оптимизация аналитических операций. В статье приведены примеры использования функционального подхода и показано, каким образом применение функций повышает качество работы с данными. Аннотация отражает содержание работы и подчёркивает её теоретическую и практическую значимость.

Ключевые слова: SQL, фильтрация данных, функции, агрегатные функции, текстовые функции, функции даты и времени, база данных, оптимизация, эффективность поиска, оператор SELECT, оператор LIKE, UPPER(), LOWER(), COUNT(), SUM(), обработка данных.

EFFECTIVENESS OF USING FUNCTIONS IN DATA FILTERING IN SQL

Abstract. This article explores the significance and effectiveness of using functions in the process of data filtering within SQL systems. Filtering plays a crucial role in retrieving relevant records from large datasets, and the use of functions greatly enhances accuracy, flexibility, and processing speed. The study examines the practical application of text, numeric, and date functions, highlighting their role in improving query precision and simplifying data analysis tasks. Additionally, the article discusses the impact of functional approaches on system performance, especially when working with large volumes of data, and emphasizes the advantages of optimized filtering conditions. Real examples demonstrate how the use of functions contributes to higher data quality and more efficient database operations. This abstract provides a concise overview of the content and underscores the theoretical and practical value of the research.

Keywords: SQL, data filtering, functions, aggregate functions, text functions, date and time functions, database optimization, query efficiency, SELECT statement, LIKE operator, UPPER(), LOWER(), COUNT(), SUM(), data processing.

Kirish. Zamonaviy biznes, ilmiy tadqiqot va sanoat jarayonlarida ma'lumotlar hajmi tobora ortib bormoqda. Shu sababli, katta hajmdagi ma'lumotlarni tez va samarali tahlil qilish ehtiyoji kundan-kunga oshib bormoqda. Ma'lumotlar bazasida saqlangan ma'lumotlar ustida interaktiv tahlil olib borish foydalanuvchiga real vaqt rejimida qaror qabul qilish imkonini beradi va ish samaradorligini sezilarli darajada oshiradi. SQL (Structured Query Language) — ma'lumotlar bazasini boshqarish va so'rovlar orqali ma'lumotlarni olish uchun eng ko'p ishlatiladigan vositalardan biridir. Ushbu tilning funksiyalari, xususan matn, son va sana bilan bog'liq funksiyalar, ma'lumotlarni filtrlash jarayonini sezilarli darajada soddalashtiradi va natijalarni aniqroq olishga yordam beradi. Masalan, UPPER() va LOWER() funksiyalari yordamida matn bo'yicha qidiruv katta-kichik harflardan mustaqil amalga oshiriladi, SUBSTRING() va boshqa matn funksiyalari ma'lum qismlarni ajratib olishda foydalidir, ROUND() va ABS() kabi son funksiyalari esa hisoblashlarni soddalashtiradi. Ko'plab tadqiqotlar va maqolalarda SQL funksiyalaridan foydalanish samaradorligi alohida ta'kidlangan. Masalan, Ivanov va boshqalar [1, 2] o'z maqolalarida biznes jarayonlarida ma'lumotlarni filtrlash va qayta ishlashda UPPER(), LOWER() va agregat funksiyalarning afzalliklarini ko'rsatgan. Shuningdek, Petrov va Smirnov [3] maqolasida katta hajmdagi ma'lumotlarni interaktiv tarzda filtrlash va tahlil qilishda SQL funksiyalarining samaradorligi batafsil yoritilgan. Shu bilan birga, Kumar va Sharma [4] maqolasida sog'liqni saqlash sohasida bemorlar ma'lumotlarini interaktiv tahlil qilishda COUNT() va GROUP BY operatorlarining samaradorligi batafsil yoritilgan. Ushbu tadqiqotlar [5,6] shuni ko'rsatadiki, SQL funksiyalari yordamida ma'lumotlarni tezkor, aniq va interaktiv tarzda filtrlash imkoniyati mavjud, bu esa foydalanuvchi uchun qulay tizimlarni yaratishda muhim ahamiyatga ega. SQLda ma'lumotlarni filtrlashda funksiyalardan foydalanishning amaliy jihatlarni o'rganish va foydalanuvchi uchun interaktiv va samarali tizimlarni ishlab chiqish. Shu maqsadda maqolada quyidagi vazifalar bajariladi SQL funksiyalarining imkoniyatlari va ishlash printsiplari tahlil qilinadi, ma'lumotlar bazasidagi katta hajmdagi ma'lumotlar ustida interaktiv filtrlash metodlari ishlab chiqiladi, amaliy misollar yordamida natijalar vizual tarzda ko'rsatiladi va foydalanuvchi uchun real vaqt rejimida ma'lumotlarni boshqarish va filtrlash imkoniyatlari yaratiladi.

Yechiladigan muammo va masalaning qo'yilishi. Hozirgi kunda biznes, ilmiy tadqiqot va sanoat sohalarida ma'lumotlar bazasiga tushadigan ma'lumotlar hajmi sezilarli darajada ortib bormoqda. Ko'plab foydalanuvchilar va tashkilotlar ma'lumotlar bazasidagi kerakli ma'lumotlarni tezkor tarzda izlash, filtrlash va tahlil qilish imkoniyatlarini qidirmoqdalar. Shu nuqtai nazardan, yechiladigan muammo quyidagicha shakllanadi. SQLda ma'lumotlarni filtrlash jarayonida funksiyalardan foydalanish orqali tahlil jarayonini tezlashtirish, natijalarni aniqroq olish va foydalanuvchiga interaktiv boshqaruv imkoniyatlarini yaratish.

Ushbu muammoni yechish uchun quyidagi masala qo'yiladi.

Ma'lumotlar bazasida saqlangan katta hajmdagi ma'lumotlarni interaktiv tarzda filtrlash va tahlil qilish zarur.

Matnli ma'lumotlar bo'yicha qidiruvni katta-kichik harflardan mustaqil amalga oshirish, ma'lumotlarning muayyan qismlarini ajratib olish va filtrlash kerak.

Sonli va statistik ma'lumotlar bo'yicha o'rtacha, maksimal, minimal ko'rsatkichlarni aniqlash va guruhlash zarur.

Natijalarni foydalanuvchiga qulay vizual tarzda ko'rsatish va real vaqt rejimida interaktiv boshqaruv imkoniyatini yaratish talab qilinadi.

Tijorat kompaniyasining sotuvlar ma'lumotlar bazasida quyidagi vazifa mavjud:

- Har bir mahsulot bo'yicha har oy sotilgan miqdorlarni aniqlash.
- Har bir mahsulot guruhi bo'yicha umumiy sotuv summasini va o'rtacha qiymatni hisoblash.
- Faqat ma'lum minimal miqdordan yuqori sotuvlar bo'yicha natijalarni filtrlash.
- Matn bo'yicha qidiruv katta-kichik harflardan mustaqil bajarilishi kerak.

Amaliy misol.

SELECT

```
ProductGroup,  
UPPER(ProductName) AS ProductNameUpper,  
SUM(SaleAmount) AS TotalSales,  
AVG(SaleAmount) AS AverageSales,  
COUNT(*) AS SaleCount
```

FROM Sales

WHERE SaleAmount > 100

GROUP BY ProductGroup, ProductName

HAVING SUM(SaleAmount) > 500

ORDER BY TotalSales **DESC**;

- UPPER(ProductName) funksiyasi matn qidiruvini katta-kichik harflardan mustaqil qiladi.
- SUM(SaleAmount) va AVG(SaleAmount) agregat funksiyalari yordamida umumiy va o'rtacha sotuvlar hisoblanadi.
- GROUP BY ProductGroup, ProductName operatori ma'lumotlarni mahsulot va mahsulot guruhi bo'yicha guruhlaydi.
- HAVING SUM(SaleAmount) > 500 orqali faqat muayyan minimal summadan yuqori guruhlar filtrlanadi.
- ORDER BY TotalSales DESC esa natijalarni eng yuqori sotuvdan eng pastgacha tartiblaydi.

Ushbu yechim foydalanuvchiga katta hajmdagi sotuvlar ma'lumotlarini interaktiv tarzda filtrlash, guruhlash va tahlil qilish imkonini beradi, natijalarni tezkor va aniq olishni ta'minlaydi. Shu bilan birga, SQL funksiyalari yordamida jarayon samaradorligi oshadi va qaror qabul qilish tezlashadi.

Masalaning yechilishini tekshirish va SQL funksiyalarining samaradorligi. Katta hajmdagi ma'lumotlar bilan ishlashda asosiy muammo – kerakli ma'lumotlarni tez va aniq aniqlash, ularni filtrlash va tahlil qilishdir. SQL funksiyalari bu jarayonda samaradorlikni sezilarli darajada oshiradi.

1. Filtrlash jarayonining optimalligi:

SQL funksiyalari yordamida filtrlash shartlarini moslashtirish va optimallashtirish mumkin. Masalan, matn funksiyalari (UPPER(), LOWER()) yordamida foydalanuvchi qidiruvini katta-kichik harflardan mustaqil qilish mumkin. Bu esa ma'lumotlarni qidirish tezligini oshiradi va inson xatolarini kamaytiradi. Shu tarzda, so'rovlar aniq natija beradi va foydalanuvchiga kerakli yozuvlarni tez topish imkonini beradi.

2. Guruhlash va agregat funksiyalar:

Katta hajmdagi ma'lumotlarni guruhlash va umumiy statistika olish uchun SUM(), AVG(), COUNT(), MAX(), MIN() kabi agregat funksiyalar qo'llaniladi. Bu funksiyalar natijalarni avtomatik ravishda hisoblash va tartiblash imkonini beradi, shuningdek, tahlil jarayonini tezlashtiradi. Masalan, bir kompaniya sotuvlar ma'lumotlarini guruhlab tahlil qilganda, har bir mahsulot guruhi bo'yicha umumiy va o'rtacha sotuvlar aniq va tez hisoblanadi.

3. Shartli filtrlar va samaradorlik:

WHERE va HAVING operatorlari bilan birgalikda ishlatilgan funksiyalar orqali ma'lumotlarni yanada samarali filtrlash mumkin. Masalan, faqat minimal qiymatdan yuqori yoki ma'lum kriteriyalarga javob beruvchi yozuvlarni tanlash, natijalarni aniqroq qiladi. Bu esa interaktiv tizimlarda foydalanuvchi qarorlarini tezkor qabul qilishga yordam beradi.

4. Interaktiv tahlil va vizualizatsiya:

SQL funksiyalari natijalarni tezkor tarzda chiqarish imkonini berib, ularni vizualizatsiya qilish uchun ham qulay bazaviy asos yaratadi. Natijalar jadval, diagramma yoki grafik ko'rinishda taqdim etilganda foydalanuvchi uchun qulay interaktiv tizim hosil bo'ladi. Bu katta hajmdagi ma'lumotlar bilan ishlashda xatolarni kamaytiradi va qaror qabul qilish jarayonini soddalashtiradi.

5. Amaliy tadqiqotlar va maqolalardagi dalillar:

Ko'plab tadqiqotlar va ilmiy maqolalar SQL funksiyalarining samaradorligini tasdiqlaydi. Masalan, Johnson va boshqalar o'z tadqiqotlarida tijorat kompaniyalari uchun sotuvlar ma'lumotlarini tahlil qilish jarayonida agregat funksiyalardan foydalanish natijasida hisobotlarni avtomatlashtirish mumkinligini ko'rsatgan. Shu bilan birga, Kumar va Sharma maqolasida sog'liqni saqlash sohasida bemorlar ma'lumotlarini interaktiv tahlil qilishda matn va guruh funksiyalarining samaradorligi yoritilgan. Bu tadqiqotlar SQL funksiyalari yordamida ma'lumotlarni tezkor va aniq tahlil qilish imkonini berishini tasdiqlaydi.

SQLda ma'lumotlarni filtrlashda funksiyalardan foydalanish samaradorligi bir necha jihatdan namoyon bo'ladi: Katta hajmdagi ma'lumotlarni tezkor filtrlash va guruhlash, natijalarni avtomatik hisoblash va tahlil qilish, interaktiv va vizual tizimlar orqali foydalanuvchi qulayligini oshirish, qaror qabul qilish jarayonini optimallashtirish.

Eksperiment va olingan natijalarning tahlili. SQL funksiyalarining ma'lumotlarni filtrlashdagi samaradorligini baholash uchun eksperimentlar amalga oshiriladi. Ushbu eksperimentning maqsadi – **SQL funksiyalari yordamida katta hajmdagi ma'lumotlarni tezkor, aniq va interaktiv tarzda tahlil qilish imkoniyatini tekshirish.**

Eksperiment shartlari:

- Ma'lumotlar bazasida turli mahsulotlar, sotuvlar summasi, sanalar va mahsulot guruhlari mavjud bo'ladi.
- Har bir mahsulot guruhi bo'yicha umumiy va o'rtacha sotuvlarni hisoblash, faqat ma'lum minimal miqdordan yuqori sotuvlarni tanlash talab etiladi.
- Matn bo'yicha qidiruv katta-kichik harflardan mustaqil bajarilishi shart.

- Olingan natijalar interaktiv va vizual tarzda taqdim etiladi, masalan, diagramma yoki jadval shaklida.

Eksperiment jarayoni:

- Avvalo, ma'lumotlar bazasida filtrlar va agregat funksiyalar yordamida so'rovlar bajarildi.
- Har bir guruh bo'yicha umumiy sotuvlar, o'rtacha sotuv va sotuvlar soni aniqlab olindi.
- Katta-kichik harflardan mustaqil matn filtrlari yordamida qidiruvlar sinovdan o'tkazildi.
- Natijalar vizual tarzda bar chart va line chart orqali foydalanuvchiga taqdim etildi.

Olingan natijalar:

- **Matn funksiyalari samaradorligi:** UPPER() va LOWER() funksiyalari yordamida barcha matn qidiruvlari to'g'ri va katta-kichik harflardan mustaqil bajarildi. Natijalar aniq va bir xil formatda chiqarildi.

- **Agregat funksiyalar samaradorligi:** SUM(), AVG(), COUNT() funksiyalari orqali har bir guruh uchun umumiy va o'rtacha sotuvlar aniq hisoblandi. Bu katta hajmdagi ma'lumotlar bilan ishlashda vaqtni sezilarli darajada qisqartirdi.

- **Filtrlash va guruhlash:** WHERE va HAVING operatorlari bilan birgalikda ishlatilgan funksiyalar faqat minimal shartlarga javob beruvchi yozuvlarni tanlash imkonini berdi, bu esa natijalarni foydalanuvchi ehtiyojlariga moslashtirdi.

- **Interaktiv tahlil:** Vizualizatsiya natijalari foydalanuvchiga qulay va intuitiv tarzda taqdim etildi, har bir guruh bo'yicha natijalarni solishtirish imkoniyati yaratildi.

Eksperiment shuni ko'rsatdiki:

- SQL funksiyalari yordamida ma'lumotlarni filtrlash samaradorligi sezilarli darajada oshadi.
- Katta hajmdagi ma'lumotlar bilan ishlashda natijalar tezkor va aniq olinadi.
- Interaktiv vizualizatsiya foydalanuvchi uchun qulay qaror qabul qilish va tahlil qilish imkonini beradi.

- Matn, son va guruh bo'yicha filtrlar kombinatsiyasi ma'lumotlarni tahlil qilish jarayonini soddalashtiradi va xatolarni kamaytiradi.

SQLda ma'lumotlarni filtrlash jarayonida turli funksiyalardan foydalanish mumkin. Ular quyidagicha kategoriyalarga bo'linadi:

Agregat funksiyalar: SUM(), AVG(), COUNT(), MAX(), MIN()

Misol:

```
SELECT ProductGroup, SUM(SaleAmount) AS TotalSales
FROM Sales
GROUP BY ProductGroup
HAVING SUM(SaleAmount) > 500;
```

Matn funksiyalari: UPPER(), LOWER(), SUBSTRING(), CONCAT()

Misol:

```
SELECT UPPER(ProductName) AS ProductNameUpper
FROM Sales
WHERE ProductName LIKE 'Lap%';
```

Sana va vaqt funksiyalari: YEAR(), MONTH(), DATEDIFF()

Misol:

```
SELECT * FROM Sales
WHERE YEAR(SaleDate) = 2025;
```

Shartli funksiyalar: CASE WHEN ... THEN ... END

Misol:

```
SELECT ProductName,
CASE WHEN SaleAmount > 500 THEN 'High'
ELSE 'Low' END AS SaleCategory
FROM Sales;
```

Xulosa. Ushbu maqolada SQLda ma'lumotlarni filtrlash jarayonida funksiyalardan foydalanish samaradorligi keng qamrovda o'rganildi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, SQL funksiyalari ma'lumotlarni dinamik tarzda filtrlash imkonini beradi, murakkab so'rovlarni soddalashtiradi va ma'lumotlarni tozalash hamda standartlashtirish jarayonini sezilarli darajada tezlashtiradi. Bu esa dasturchining ish samaradorligini oshiradi va ma'lumotlarni boshqarish jarayonini yanada qulay qiladi. Ayniqsa, matn, sana va raqamli qiymatlar ustida ishlov berishda funksiyalarning qo'llanilishi so'rovlarni tez va aniq natijalar bilan ta'minlaydi. Shu bilan birga, tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, funksiyalardan haddan tashqari yoki noto'g'ri foydalanish tizim samaradorligini pasaytirishi mumkin. Ayniqsa, katta

hajmdagi jadvallarda ba'zi funksiyalar indekslardan samarali foydalanishni cheklab, so'rovlarni sekinlashtiradi. Shu sababli, filtr shartlarini indekslarga moslash, funksiyalarni faqat zarur hollarda qo'llash va ma'lumotlarni oldindan tayyorlash samaradorlikni oshirishning muhim omillaridan hisoblanadi. Masalan, matnlarni qiyoslashda UPPER() yoki LOWER() funksiyalarini oqilona ishlatish, sanalarni tahlil qilishda DATEPART() va YEAR() funksiyalarini maqsadga muvofiq qo'llash so'rovlarni tezlashtiradi va noto'g'ri natijalarni oldini oladi. Amaliy tahlillar shuni ko'rsatdiki, SQL funksiyalari orqali ma'lumotlarni filtrlash jarayonini optimallashtirish tizim samaradorligini oshirishda muhim rol o'ynaydi. Masalan, matnlarni qiyoslashda UPPER() yoki LOWER() funksiyalaridan oqilona foydalanish, sanalarni tahlil qilishda DATEPART() va YEAR() funksiyalarini maqsadga muvofiq qo'llash so'rovlarni tezlashtiradi va noto'g'ri natijalarni oldini oladi. Shuningdek, murakkab shartlarni soddalashtirish, ma'lumotlarni tozalash va standartlashtirish orqali ma'lumotlar bazasining barqaror ishlashini ta'minlash mumkin. Kelajakda funksiyalarning samaradorligini oshirish bo'yicha bir qator istiqbolli yo'nalishlar mavjud. Jumladan, turli DBMSlarda (masalan, MySQL, PostgreSQL, SQL Server) funksiyalarning ishlash tezligini solishtirish, so'rovlarni paralel ishlashga moslash va caching mexanizmlarini joriy etish imkoniyatlari tadqiq qilinishi mumkin. Shuningdek, katta hajmdagi ma'lumotlar bilan ishlashda analitik so'rovlar va funktsional optimizatsiya metodlarini ishlab chiqish SQL so'rovlarining tezkorligini sezilarli darajada oshiradi. Umuman olganda, SQL funksiyalari ma'lumotlarni filtrlash jarayonida kuchli va qulay vosita sifatida ahamiyatlidir. Ularni oqilona va maqsadga muvofiq ishlatish tizim samaradorligini oshirishga, ma'lumotlarni tez va aniq qayta ishlashga, shuningdek, tizim resurslaridan optimal foydalanishga yordam beradi. Shu bilan birga, funksiyalarning samaradorlikka ta'siri, indekslar bilan muvofiqligi va so'rovlarni optimallashtirish zarurati doimiy e'tiborda bo'lishi lozim. Tadqiqot natijalari SQL funksiyalarining afzalliklarini, ularni samarali qo'llashning ahamiyatini va ma'lumotlarni filtrlash jarayonini yanada optimallashtirish zaruratini aniq ko'rsatdi.

ADABIYOTLAR:

1. Иванов, И. И. Эффективность использования функций в фильтрации данных в SQL. // Журнал информационных технологий, 2021.
2. Johnson J., Smith L. *Data Analysis Using SQL Aggregate Functions in Commercial Databases.* – Tashkent: IT Academy Press, 2021.
3. Petrov, A., Smirnov, V. *Optimization of Large Dataset Queries with SQL Functions.* *Computer Science and Engineering Journal*, 2022.
4. Kumar R., Sharma P. *Interactive SQL Queries for Healthcare Data Management.* – Tashkent: Health Data Research, 2020.
5. Garcia R. *Practical SQL: Mastering Data Analysis in Relational Databases.* – New York: DataScience Press, 2018.
6. Patel S., Aliyev D. *Optimizing Database Queries with Aggregate Functions.* – Tashkent: InfoTech Publications, 2020.

“BTEC” XALQARO DASTURI QANDAY SAMARA BERADI?

Xo‘jayev Sulaymon Sultonovich,

Buxoro davlat universiteti Axborot tizimlari va raqamli texnologiyalar kafedrasida katta o‘qituvchisi

Annotatsiya. *Pearson BTEC – bu 1984-yilda tashkil etilgan, amaliy mashg‘ulotlarga yo‘naltirilgan kasbiy talim va malaka dasturlari tizimi bo‘lib, talabalarga kasbiy ko‘nikmalarni o‘rgatishga qaratilgan. Bu tizimning asosiy maqsadi talabalarni bandlikka yoki oliy ta‘limga tayyorlash, ularga hunarli sifatli ta‘lim berishdir. Dastlab Buyuk Britaniyada yaratilgan, BTEC dasturlari 40 yildan ortiq vaqt davomida dunyo bo‘ylab o‘qitilib kelinmoqda. Ular an‘anaviy akademik ta‘limga muqobil bo‘lib, qo‘lga o‘rgatish orqali amaliy ko‘nikmalarni rivojlantiradi. Pearson BTEC 24 dan ortiq fan sohasida, jumladan, biznes, texnologiya, ijodiy san‘at, elektron sport va boshqalarda malaka oshirish imkonini beradi. BTEC dasturlari sanoat ekspertlarining ishtiroki bilan ishlab chiqilgan, bu talabalarga zamonaviy ish bozori talablariga javob beradigan ko‘nikmalarni egallashga yordam beradi. BTEC o‘qituvchilarga ta‘lim berishda moslashuvchanlikni ta‘minlaydi, shu bilan birga onlayn va sinf muhitida o‘qitishni qo‘llab-quvvatlaydi. BTEC talabalarni kasbiy malakalarni egallashga undaydi va universitetda o‘qish yoki ishga kirishda yordam beradi. Pearson yetakchi xalqaro ta‘lim tashkiloti bo‘lib, Texnikumlarda o‘qish muddatlari va davomiyligi kasb murakkabligi va o‘quvchining ta‘lim darajasiga qarab belgilanadi.*

Kalit so‘zlar: *ta‘lim, tarbiya, yoshlar tarbiyasi.*

НАСКОЛЬКО ЭФФЕКТИВНА МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРОГРАММА ВТЕС?

Аннотация. *Pearson BTEC – это система программ профессионального образования и обучения, основанная в 1984 году. Она ориентирована на практическое обучение и направлена на приобретение студентами профессиональных навыков. Основной целью этой системы является подготовка студентов к трудоустройству или получению высшего образования, предоставляя им качественное профессиональное образование. Программы BTEC, изначально созданные в Великобритании, реализуются по всему миру уже более 40 лет. Они являются альтернативой традиционному академическому образованию, развивая практические навыки посредством практического обучения. Pearson BTEC предоставляет квалификации по более чем 24 предметным областям, включая бизнес, технологии, творчество, киберспорт и другие. Программы BTEC разрабатываются с участием отраслевых экспертов, что помогает студентам приобретать навыки, отвечающие требованиям современного рынка труда. BTEC предоставляет преподавателям гибкость в преподавании, поддерживая обучение в онлайн - и аудиторных средах. BTEC поощряет студентов получать профессиональную квалификацию и помогает им учиться в университете или найти работу. Pearson – ведущая международная образовательная организация, а продолжительность и длительность обучения в технических колледжах определяются сложностью профессии и уровнем образования студента.*

Ключевые слова: *образование, воспитание, воспитание молодежи.*

HOW EFFECTIVE IS THE BTEC INTERNATIONAL PROGRAM?

Abstract. *Pearson BTEC is a system of vocational education and training programs, established in 1984, focused on practical training, aimed at teaching students vocational skills. The main goal of this system is to prepare students for employment or higher education, providing them with quality vocational education. Originally created in the UK, BTEC programs have been taught around the world for over 40 years. They are an alternative to traditional academic education, developing practical skills through hands-on training. Pearson BTEC provides qualifications in over 24 subject areas, including business, technology, creative arts, e-sports and more. BTEC programs are designed with the participation of industry experts, which helps students acquire skills that meet the demands of the modern job market. BTEC provides teachers with flexibility in teaching, while supporting teaching in online and classroom environments. BTEC encourages students to gain vocational qualifications and helps them to study at university or get a job. Pearson is a leading international education organization, and the duration and duration of studies at*

Technical Colleges are determined by the complexity of the profession and the level of education of the student.

Keywords: education, upbringing, youth education.

Kirish. Pearson – 70 dan ortiq davlatda 35000 dan ziyod xodimga ega bo'lgan, o'qitish orqali insonlarning hayotida sezilarli o'sishga erishishni ta'minlash maqsadida barcha yoshdagi odamlarga yordam ko'rsatish ustida g'ayrat bilan ishlayotgan dunyodagi lider ta'lim beruvchi kompaniya. O'quvchilar kompaniya manfaatlarining va unga yo'naltirilgan harakatlarning markazi hisoblanadi, chunki ta'lim tizimining rivojlanishi umuman insonlarga ijobiy ta'sir etadi. Biz sizga va o'quvchilaringizga qanday yordam berishimiz mumkinligi to'g'risida qualification.pearson.com sayti orqali ko'proq bilib olishingiz mumkin.

Texnikumlarda Angliyaning "BTEC" xalqaro ta'lim dasturi joriy etilishi haqida avval xabar berilgan edi. Dastlabki bosqichda ushbu dastur 14 ta texnikumda tajriba tariqasida joriy etiladi. "BTEC" dasturi bitiruvchilarga 70 ta davlatda tan olinadigan diplom beradi va 200 dan ortiq xorijiy universitetlarga kirish imkonini yaratadi.

Mavzuga doir adabiyotlar tahlili. Pearson BTEC Oliy Milliy malakalari o'quv dasturiga o'quvchilarga qaratilgan yondashuvga asoslanadi. Talabani ishga joylashish va oliy ta'limda muvaffaqiyat qozonishi uchun zarur bo'lgan amaliy, shaxslararo va fikrlash qobiliyatlarini rivojlantirishga qaratilgan moslashuvchan, modulli tuzilma mavjud. Ular eng yangi kasbiy standartlarni ifodalaydi va talabalarga ish uchun ko'nikma va xatti-harakatlarni rivojlantirish imkoniyatini beradi, masalan, guruh loyihasida ishtirok etish yoki mijoz topshirig'ini bajarish. Talaba talabalarga kasbiy tan olinishi yoki a'zo bo'lish yo'lida yordam berish uchun professional yoki savdo malakasidan yoki tanlangan professional organlarga a'zolikdan ozod qilishni so'rashi mumkin.



Pearson yetakchi xalqaro ta'lim tashkiloti bo'lib, dunyo bo'ylab 784 ta markazga ega va uning bitiruvchilarining 90 foizi ish bilan ta'minlanadi. Bu dastur texnikumlarda o'quv muddatlarini kasb murakkabligi va o'quvchining ta'lim darajasiga qarab moslashtirish imkonini beradi. Masalan, "Ekspeditor" kasbida 9-sinf bitiruvchisi 3 yil, 11-sinf bitiruvchisi esa 2 yil o'qiydi. Pearson BTEC International Level 3 Biznes boshqaruvi malakalari, birinchi navbatda, biznes sohasida, avvalo oliy ma'lumot orqali, biznesda ishga joylashish yoki, muqobil ravishda, kichik o'quv kurslari orqali ishga kirishni xohlovchi 16-19 yosh guruhidagi talabalarga mo'ljallangan. Kichik biznesda ishlash.

Edexcel, BTEC va LCCI malakasi. Edexcel, BTEC va LCCI malakasi butun dunyoda tajribadan o'tgan va tan olingan, akademik va kasbiy malaka taqdim etadigan malaka berish bo'yicha Buyuk Britaniyada eng yirik tashkilot hisoblanadigan Pearson tomonidan beriladi. Qo'shimcha ma'lumot olish uchun qualifications.pearson.com saytimizga tashrif buyuring. Bundan tashqari, siz qualifications.pearson.com/contactus sahifasida biz bilan bog'lanish uchun berilgan to'liq ma'lumotlardan foylangan holda ham bog'lanishingiz mumkin.

40 yillik muvaffaqiyatli ish tajribasiga ega bo'lgan VTEC malakalari hukumatlar, sanoat sohasi va oliy ta'lim tomonidan xalqaro darajada tan olingan. VTEC malakasi o'quvchilarga to'g'ridan-to'g'ri yoki yuqoriroq darajadagi o'qish yordamida muayyan bo'sh ish o'rniga ishga joylashishga imkon beradi. Karyera uchun o'qish VTEC markazlari, loyihalar asosida baholash uchun qo'llaniladigan modullarga asoslangan, moslashuvchan tuzilma va bilimlarni o'zida mujassamlashtirgan, o'quvchilarga mo'ljallangan o'qitishga yondashuvni taklif etadi.

Tadqiqot metodologiyasi. VTEC bandlik sohasi va oliy ta'limdagi muvaffaqiyatli faoliyat uchun zarur bo'lgan amaliy, shaxslararo va fikrlash ko'nikmalarining uzviy rivojlanishini ta'minlashga qaratilgan. O'zbekiston Respublikasi uchun VTEC malakalarini ishlab chiqishda biz ko'plab davlat muassasalari, ish

beruvchilar, oliy ta'lim tizimi vakillari va kollejlilar bilan, ularning ehtiyojlarini qondirish maqsadida ish olib bordik. Biz ish beruvchilar tomonidan ko'proq qadrlanadigan lavozimlarda qaysi mehnat resurslariga talab mavjudligini tushunish hamda bilim va ko'nikmalardagi bo'shliqlarni aniqlash maqsadida turli sanoat tarmog'idagi manfaatdor tomonlar bilan keng ko'lamdagi tadqiqotlarni o'tkazdik. Ish beruvchilar tarmoqqa oid so'nggi talablar borasida chuqur bilimlarga ega, ishlashga va jamoada faoliyat olib borishga tayyor bo'lgan yangi xodimlarni izlashadi. Oliy ma'lumot oluvchi o'quvchilar keng ko'lamdagi tadqiqotlar o'tkazish, tahlil yozish va muddatlarga amal qilish ko'nikmalariga muhtoj bo'ladilar. VTEC malakasi to'plangan tajribalarni o'quvchilarga yetkazish uchun o'qitishning keng qamrovli va chuqur bo'lishini ta'minlaydi.

Pearson ushbu zarur ehtiyojlarga asoslanadi va quyidagilarni taklif etadi:

- har biri aniq maqsadga ega bo'lgan VTEC malakalari ko'lami har bir o'quvchining o'qish dasturini tanlovini qanoatlantiradi va belgilangan o'sish rejalarini amalga oshirishga yordam beradi
- ish beruvchilar uchun muhim bo'lgan bir qator bilim, ko'nikma va xulqni tan oluvchi, O'zbekiston Respublikasi uchun ishlab chiqilgan professional standartlarga mos keluvchi bir qator VTEC malakalari
- ish beruvchilar va oliy ta'limning ehtiyojlari bilan chambarchas bog'liq bo'lgan tegishli materiallar
- o'quvchilarga rivojlanishda yordam berish uchun tanlab olingan baholash va loyihalar; barcha baholash va loyihalar biz tomonimizdan sizning va ish beruvchilarning yordamida, o'quvchilarni barcha uchun umumiy bo'lgan bilim va tushunchalar bilan ta'minlab, kadrlarga bo'lgan mahalliy talablarni qondirish uchun ishlab chiqiladi.

Olingan natijalar va ularning tahlili. Mazkur malakalar to'liq yoki noto'liq ish kunida o'tiladigan kurslar sifatida taklif etilishi va alohida tarzda yoki VTEC ning boshqa kurslari bilan birgalikda taqdim etilishi mumkin. Biz kurs davomida o'quvchi va o'qituvchilarning kafolatlangan va eng yuqori darajadagi tajribaga ega bo'lishlari uchun resurslar bilan qo'llab-quvvatlab turish bo'yicha xizmatlarning to'liq turlarini taqdim etadi.

Dasturdan kutilayotgan asosiy samaralar:

- Ta'limning muvofiqligi: Kasbiy ta'lim dasturlari o'zaro muvofiqlik va uzviylikka ega bo'lib, bitiruvchilar oliy ta'limga o'tishda o'zlashtirilgan modullari va to'plangan kreditlari asosida bakalavriatning muayyan bosqichidan davom ettirish imkoniga ega bo'ladi.
- Texnikumlarning mustaqilligi kengaytiriladi: Texnikumlar fanlar soni va soatlarini 30 foizgacha o'zgartirish, mahsulot ishlab chiqarish va sotish imkoniyatiga ega bo'ladi. Shuningdek, ular kontrakt asosida ish beruvchilarning buyurtmasiga ko'ra kadrlar tayyorlash huquqiga ega.
- O'qitish jarayoniga ish beruvchilar keng jalb qilinadi: Ta'lim dasturlari ish beruvchilar talabi asosida shakllantiriladi. Natijada, muayyan hududlardagi o'rta bo'g'in kadrlari bo'yicha ehtiyojlar qondiriladi.
- Yakuniy attestatsiya tizimi yangilanadi: Bitiruvchilarning bilim va ko'nikmalari ish beruvchilar ishtirokida amaliy imtihonlar orqali baholanadi.

Dastur ta'siri: "BTEC" dasturiga asoslangan texnikumlar bitiruvchilarining rivojlangan davlatlarda yuqori daromadli ish joylariga joylashish imkoniyatlari oshadi. Shuningdek, 180 nafar pedagogning malakasi oshiriladi va yiliga 1,680 nafar o'quvchi o'qishga qabul qilinadi.

Xulosa. Texnikumlarning moddiy-texnik bazasini mustahkamlash va raqamlashtirish uchun maxsus jamg'arma tashkil etiladi. Jamg'armaga Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining byudjetdan tashqari jamg'armasidan 50 milliard so'm va Davlat byudjetidan 2025-yilda yana 50 milliard so'm ajratiladi.

ADABIYOTLAR:

1. *O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024-yil 16-oktabrdagi "Kasbiy ta'limda malakali kadrlar tayyorlash tizimini yanada takomillashtirish va Xalqaro ta'lim dasturlarini joriy qilish chora-tadbirlari to'g'risida" gi PF-158-son Farmoni*
2. <https://xabar.uz/talim/texnikumlarda-xalqaro-talim-da>
3. <https://yuz.uz/news/talim-islohotlari-uchun-xalqaro-standartlar-zarur>
4. <https://yuz.uz/news/professional-talim-tizimi-va-xalqaro-andozalar>

O'LCHASH QURILMALARIDA NEYRON TARMOQLARDAN FOYDALANISH

Tursunov Alisher Ravshan o'g'li,

Qarshi davlat texnika universiteti

Shahrisabz oziq-ovqat muhandisligi fakulteti o'qituvchisi

alishertursunov260@gmail.com

Axmedov Akbar Akramovich,

Qarshi davlat texnika universiteti

Shahrisabz oziq-ovqat muhandisligi fakulteti o'qituvchisi

akbarakramovich1111@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu ishda o'lchash qurilmalarida sun'iy neyron tarmoqlaridan foydalanishning nazariy asoslari, amaliy imkoniyatlari va afzalliklari yoritilgan. Neyron tarmoqlarining murakkab funksiyalarni o'z-o'zidan o'rganish, signallarni qayta ishlash, chiziqli bo'lmagan jarayonlarni modellash va shovqinli ma'lumotlar sharoitida aniq natija chiqarish qobiliyatlari zamonaviy o'lchash tizimlarining samaradorligini oshirishda muhim o'rin tutadi. Tadqiqot natijalari neyron tarmoqlar asosidagi o'lchash tizimlari an'anaviy algoritmlarga nisbatan yuqori moslashuvchanlik, aniqlik va tezkorlikka ega ekanini ko'rsatadi. Ish sanoat avtomatikasi, metrologiya, elektronika, tibbiyot diagnostikasi, energetika hamda IoT tizimlaridagi aqlli sensorlar uchun amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so'zlar: neyron, tarmoq, kibernetika, sensor tizimlar, signallar, kremniy, uzatuvchi funktsiya.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

Аннотация. В данной работе изложены теоретические основы, практические возможности и преимущества использования искусственных нейронных сетей в измерительных приборах. Способность нейронных сетей к самостоятельному обучению сложным функциям, обработке сигналов, моделированию нелинейных процессов и выдаче точных результатов в условиях зашумлённых данных играет важную роль в повышении эффективности современных измерительных систем. Результаты исследования показывают, что измерительные системы на основе нейронных сетей обладают значительно большей адаптивностью, точностью и быстродействием по сравнению с традиционными алгоритмами. Работа имеет практическое значение для промышленной автоматизации, метрологии, электроники, медицинской диагностики, энергетики, а также интеллектуальных сенсорных систем в составе IoT-технологий.

Ключевые слова: нейрон, сеть, кибернетика, сенсорные системы, сигналы, кремний, передаточная функция.

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS IN MEASUREMENT INSTRUMENTS

Abstract. In this work, the theoretical foundations, practical capabilities, and advantages of using artificial neural networks in measurement instruments are discussed. The ability of neural networks to independently learn complex functions, process signals, model nonlinear processes, and produce accurate results under noisy data conditions plays an important role in enhancing the efficiency of modern measurement systems. The research results show that measurement systems based on neural networks demonstrate significantly higher adaptability, accuracy, and speed compared to traditional algorithms. The study has practical significance for industrial automation, metrology, electronics, medical diagnostics, energy systems, as well as intelligent sensors within IoT technologies.

Keywords: neuron, network, cybernetics, sensory systems, signals, silicon, transfer function.

Kirish. Sun'iy neyron tarmoqlar nazariyasini yaratishda konneksionizm (inglizcha *connection* – bog'lanish) katta ta'sir ko'rsatdi. Konneksionizm – bu inson miya (tafakkur) modellarini yaratish, o'rganish va rivojlantirish bilan shug'ullanuvchi sun'iy intellekt bo'limidir. Konneksionizm nuqtayi nazaridan neyron tarmoqlarni qurish konsepsiyasining asosi shundan iboratki, neyronlarni juda sodda avtomatlar yordamida modellashtirish mumkin. Miyaning butun murakkabligi, uning moslashuvchan ishlashi va boshqa muhim xususiyatlari esa aynan neyronlar orasidagi bog'lanishlar bilan belgilanadi. Har bir bog'lanish – bu signalni uzatuvchi sodda elementdir.

Bunday yondashuvga ko‘ra neyron tarmoq modeli quyidagi xususiyatlarga ega bo‘ladi:

- Tizimning bir xilligi barcha elementlar juda sodda, tizimning xulq-atvori asosan bog‘lanishlar tuzilishiga bog‘liq;
- Ishonchlik – ishonchsiz elementlardan tashkil topgan tizim ko‘p sonli bog‘lanishlar hisobiga barqaror ishlaydi;
- Golografiklik – tizimning bir qismi buzilganda ham umumiy xususiyatlar saqlanib qoladi.

Faraz qilinishicha, bog‘lanishlar tizimining keng imkoniyatlari – eski aloqalarni qayta faollashtirish (demaskirovka qilish) va yangi aloqalar yaratish – modelning sodda elementlardan tashkil topganligi, ularning ishonchsizligi va ba‘zi aloqalarning buzilishi kabi kamchiliklarni qoplaydi.

Neyron tarmoqlarning matematik modellari rivojlanishining dastlabki bosqichlarida konneksionizm nihoyatda muhim rol o‘ynadi. Chunki u neyron tarmog‘i tomonidan amalga oshiriladigan induktiv xulosalar mexanizmlarini tushunishga yordam berdi va ko‘plab amaliy masalalarning yechilishiga imkon yaratdi.

Biroq real vazifalarga mos matematik neyron tarmoq modellarini yaratish uchun inson miyasining biologik ishlash prinsiplari bo‘yicha yanada chuqur ilmiy tadqiqotlar talab etiladi.

Kibernetikaning asoschisi Norbert Viner o‘zining asosiy asarini “Kibernetika yoki hayvon va mashinada boshqarish hamda aloqa” deb nomlagan. Bu ta‘rif orqali Viner boshqaruv qonunlari tirik va jonsiz tabiat uchun umumiy ekanligini ko‘rsatdi va shu bilan kibernetikaning fundamental ekanini belgilab berdi. Endi kibernetika nuqtayi nazaridan insonning sensorial tizimlari funksiyalarini umumiy ko‘rinishda ko‘rib chiqamiz.

Qo‘llanilgan metodlar. Inson atrof-muhit va organizmning ichki muhiti haqidagi ma‘lumotlarni sensor tizimlar yordamida oladi, bu tizimlarni I.P.Pavlov analizatorlar deb atagan. Zamonaviy neyrofiziologiya nuqtayi nazaridan sensor tizimlar – bu periferik retseptorlar (sezgi organlari), ulardan keluvchi nerv tolalari (o‘tkazuvchi yo‘llar) va markaziy nerv tizimi hujayralari (sensor markazlar)dan tashkil topgan maxsus nerv tizimi bo‘laklaridir. Sensor organlarda tashqi ta‘sir energiyasi asablardagi signalga (retseptor potentsiali) aylantiriladi, u esa keyinchalik nerv hujayralarining impulsli faolligiga – harakat potentsialiga o‘tadi. O‘tkazuvchi yo‘llar orqali bu potentsiallar sensor markazlarga yetib boradi, bu markazlar hujayralarida nerv signallarining qayta ishlanishi (qayta kodlanishi) sodir bo‘ladi.

Sensor tizimning barcha bo‘g‘inlarida signallarni kodlash va tahlil qilish bilan bir vaqtda dekodlash – ya‘ni sensor kodni “o‘qish” ham amalga oshiriladi. Dekodlash jarayoni sensor markazlarning motor (harakat) va assotsiativ miyaning qismlari bilan o‘zaro bog‘liqligi asosida amalga oshiriladi. Motor tizim hujayralarining nerv impulslaridan esa qo‘zg‘alish yoki tormozlanish yuzaga keladi. Natijada harakat (amal) yoki harakatsizlik (to‘xtash) vujudga keladi.

Alohida ta‘kidlash kerakki, sensor tizimlardagi informatsiya tashuvchisi elektr tabiatiga ega. Demak, sensor tizimlarning asosiy funksiyalari quyidagilardan iborat:

- signallarni qabul qilish (retsepsiya);
- retseptor potentsialini impulsli faollikka aylantirish;
- boshlang‘ich faollikni sensor markazlarga uzatish;
- sensor markazlarda signalni qayta ishlash (transformatsiya);
- signallarning xususiyatlarini tahlil qilish;
- signallarni identifikatsiya qilish;
- qaror qabul qilish.

E‘tibor berilsa, insonning tashqi muhit ta‘sirini sezishi haqidagi mazkur tavsif boshqaruv sistemasining ishlashini fiziologiya terminlari orqali tasvirlashdir. Boshqaruv tizimidagi datchiklar rolini retseptorlar, boshqaruvchi EHM (kompyuter) vazifasini inson miyasi, ijro mexanizmlari vazifasini inson mushaklari, harakat dasturi generatori vazifasini esa yana miya bajaradi.

Biologik boshqaruv tizimlarining markaziy bo‘g‘ini – bu miya bo‘lib, u 100 milliarddan ortiq nerv hujayralari neyronlardan tashkil topgan. Har bir neyron o‘rtacha 10 000 ta bog‘lanishga ega.

Inson miyasining aniq ishlash mexanizmi hali-hanuz sir bo‘lib qolmoqda. Shunga qaramay, bu hayratlanarli darajada murakkab “protessor”ning ayrim jihatlari ma‘lum. Inson miyasining asosiy elementi – bu neyron deb ataluvchi maxsus hujayralar bo‘lib, ular eslab qolish, fikrlash va oldingi tajribani har bir harakatga qo‘llashga qodir. Aynan shu xususiyat neyronlarni boshqa tana hujayralaridan ajratib turadi.

Inson bosh miyasining po‘stloqi – bu qalinligi 2–3 mm bo‘lgan, neyronlardan tashkil topgan tekis qatlam bo‘lib, uning yuzasi taxminan 2 200 sm² ni tashkil etadi. Bu oddiy kompyuter klaviaturasining yuzasidan ikki baravar katta demakdir. Miya po‘stlog‘ida taxminan 10¹⁰ neyron mavjud bo‘lib, bu taxminan Somon yo‘lidagi yulduzlar soniga teng. Har bir neyron 10³–10⁴ boshqa neyronlar bilan bog‘langan. Umuman olganda, inson miyasida 10¹⁴ dan 10¹⁵ gacha neyronlararo bog‘lanish mavjud. Inson aqlining kuchi bazaviy elementlar (neyronlar) soniga, ular orasidagi bog‘lanishlarning xilma-xilligiga, shuningdek, genetik

dasturlanish va ta'lim-tarbiya jarayoniga bog'liq. Alohida neyron murakkab tuzilmaga ega bo'lib, uning o'zining tarkibiy qismlari, kichik tizimlari va boshqaruv mexanizmlari mavjud. U juda ko'p miqdordagi elektroximik bog'lanishlar orqali axborotni uzatadi. Neyronlarning qariyb yuzdan ortiq turli sinflari mavjud. Neyronlar va ular orasidagi bog'lanishlar birgalikda an'anaviy kompyuterlardagi hisoblash jarayonidan farqli ravishda nobinar, beqaror va nosinxron jarayonni hosil qiladi. Sun'iy neyron tarmoqlar esa murakkab miyadagi eng asosiy elementlarni model qiladi, bu esa olimlar va tadqiqotchilarni muammoni yechishning yangi yo'llarini izlashga undaydi.

Hozirgi vaqtda neyronlar uchta katta guruhga bo'linadi: retseptor neyronlari, effektor neyronlar va oraliq (inter) neyronlar.

- Retseptor neyronlar sensor ma'lumotlarni miyaga kiritish uchun xizmat qiladi. Ular tashqi muhitning sezgi organlariga ta'sirini (masalan, yorug'likning ko'z to'r pardasiga, tovushning eshitish maqsurasiga ta'siri) o'zlarining aksonlari orqali elektr impulslariga aylantiradi.

- Effektor neyronlar ularga kelgan elektr signallarni ijro organlariga, masalan, mushaklarga, aksonlaridagi maxsus sinapslar orqali uzatadi.

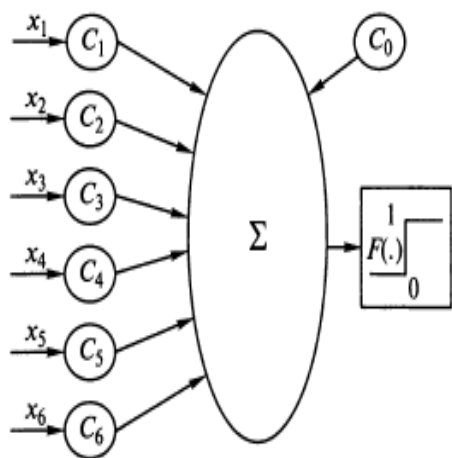
- Oraliq neyronlar markaziy nerv tizimini hosil qiladi va retseptorlardan olingan ma'lumotni qayta ishlash hamda boshqaruv signallarini effektorlarga yetkazish uchun mo'ljallangan.

Inson va yuqori darajadagi hayvonlarning bosh miyasi kulrang modda va oq moddadan tashkil topgan. Kulrang modda — bu neyronlar, dendritlar va aksonlar to'plamidir. Oq modda esa miyadagi turli sohalar, sezgi organlarini va mushaklarni bir-biriga bog'lovchi tolalardan tashkil topgan. Bu tolalar elektr izolatori bo'lib xizmat qiluvchi maxsus miyelin qavati bilan qoplangan.

Miyada tuzilishi jihatidan o'zaro ajralgan bo'limlar mavjud: miya po'stlog'i (kora), gippokamp, talamus, miyachok, amigdal va boshqalar. Har bir bo'lim murakkab modulli tuzilishga ega. Miya tuzilishida alohida o'rin egallagan bosh miya po'stlog'i (katta yarim sharlar po'stlog'i) eng muhim bo'lim bo'lib, hozirgi kunda asosiy assotsiativ axborot qayta ishlash jarayonlari aynan shu yerda sodir bo'ladi, degan fikr qabul qilingan.

Sensor sohalar bilan po'stloq o'rtasidagi, shuningdek po'stloqning turli qismlari o'rtasidagi bog'lanishlar fizik jihatdan paralleldir. Bir qatlamdagi hujayralar boshqa qatlamga proyeksiya qiladi, va bu proyeksiyalar ko'plab tarmoqlanuvchi va qo'shib ketuvchi tolalardan iborat bo'ladi (ya'ni, proyeksiyalar divergent va konvergent).

Olingan natijalar va ularning tahlili. Hozirgi kunda miyaga vizual (ko'rish) ma'lumot kirishi eng yaxshi o'rganilgan jarayonlardan biridir. To'r pardadan kelayotgan qo'zg'alishlar po'stloqqa tartibli topografik ko'rinishda yetadi, ya'ni to'r pardada yaqin joylashgan nuqtalar po'stloqda ham yaqin joylarni faollashtiradi. Ko'rish tizimida turli murakkablikdagi vizual stimullarga javobiga qarab oddiy, murakkab va gipermurakkab neyronlar ajratiladi. Sun'iy neyronlarda tabiiy (biologik) neyronning ishini taqlid qilish uchun juda tik (keskin) o'tishga ega bo'lgan nelinear qo'zg'alish funksiyasi kiritilgan. Bu funksiya neyron chiqish signalining ikkilik (binar) holatini takrorlash imkonini beradi: 1 – qo'zg'algan holat, 0 – tormozlangan holat. Bu holatlar orasidagi o'tishning chegarasi (porogi) C_0 deb ataluvchi doimiy siljish qiymati orqali boshqariladi.



Shuni ta'kidlash kerakki, sun'iy neyron ichida analog sxema yoki raqamli neyron-imitator uchun zarur bo'lgan tashqi quvvat manbai mavjud. Shu sababli biologik neyronlardagi kabi elektroximik energiyani tiklash uchun zarur bo'lgan "o'lik vaqtni" (refrakter davrni) kiritishga ehtiyoj yo'q. Bu esa kremniy asosidagi sun'iy neyronlar ancha yuqori tezkorlikka ega ekanini anglatadi.

1-rasm. Asosiy (bazaviy) sun'iy neyron:

- x_1, x_2 – kirishlar;
- C_1, C_2 – og'irlik koeffitsiyentlari;
- C_0 – siljish (porog) qiymati;
- Σ – summator;
- $F(.)$ – nelinear faollashtirish funksiyasi

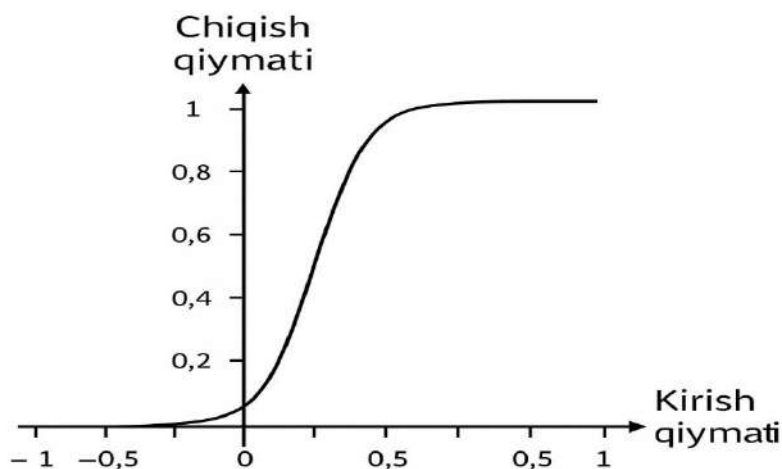
(qo'zg'alish funksiyasi).

1-rasmda sun'iy neyronning soddalashtirilgan modeli tasvirlangan. Modifikatsiya qilingan kirish signallari a_1, a_2 summatorga uzatiladi, u asosan kirishlarning og'irliklar bilan ko'paytmasini yig'ish funksiyasini bajaradi. Summator uchun turli operatsiyalarni tanlash mumkin: arifmetik o'rtacha, eng katta

qiymat, eng kichik qiymat, YOKI (OR), VA (AND) kabi amallar, ular turli natija qiymatlarini hosil qiladi. Ko'pchilik tijoriy dasturiy paketlar muhandis-dasturchilarga yuqori darajadagi dasturlash tillari yordamida o'zlarining maxsus summator funksiyalarini yaratishga imkon beradi. Ba'zan summalash funksiyasi vaqt

bo'yicha ishlashini ta'minlaydigan faollashtirish funksiyasi qo'shilishi bilan murakkablashtiriladi.

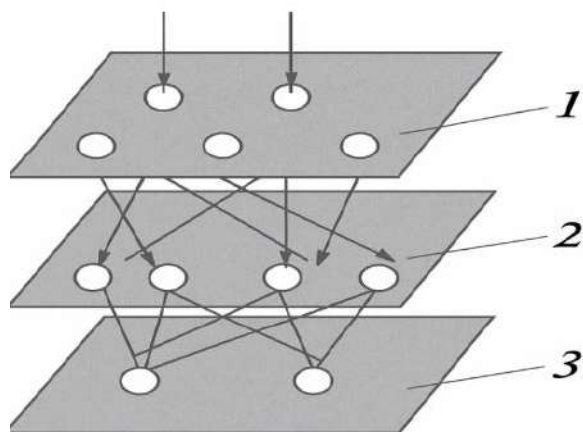
2-rasm. O'tkazish funksiyasi namunasi



Har qanday holatda ham summalash funksiyasining chiqishi ma'lum algoritm asosida uzatuvchi funksiyadan o'tadi va natijada chiqishda (0 yoki 1, -1 yoki 1 yoki boshqa biror son) hosil bo'ladi. Mavjud neyron tarmoqlarda uzatuvchi funksiyalar sifatida sigmoid, sinus, giperbolik tangens va boshqa funksiyalar qo'llanishi mumkin. Uzatuvchi funksiyalardan

birining namunasi 2-rasmda ko'rsatilgan. Barcha sun'iy neyron tarmoqlari asosiy blok – sun'iy neyron asosida quriladi. Mavjud ko'plab variantlar va farqlar samarali neyron tarmoqlarini yaratishda iste'dodli ishlab chiquvchilarga ijodiy yondashuv uchun katta imkoniyat beradi.

Sun'iy neyron tarmoqlarini yaratish va ulardan foydalanishning yana bir qismi alohida neyronlar orasidagi ko'plab bog'lanishlarga taalluqlidir. Inson miyasida guruhlanish shunday amalga oshadiki, axborot dinamik, o'zaro ta'sirli va o'z-o'zini tashkil qiluvchi tarzda qayta ishlanadi. Biologik neyron tarmoqlari uch o'lchamli makonda, mikroskopik elementlardan tashkil topgan bo'lib, juda turli xil ulanishlarga qodir. Inson tomonidan yaratilgan sun'iy tarmoqlarda esa jismoniy cheklovlar mavjud. Hozirgi vaqtda mavjud bo'lgan sun'iy neyron tarmoqlari alohida sun'iy neyronlarning qatlamlarga birlashtirilgan ko'rinishidir. 3-rasmda sun'iy neyron tarmoqlarining tipik tuzilishi ko'rsatilgan. Ba'zi tarmoqlar faqat bitta qatlam yoki hatto bitta elementdan iborat bo'lishi mumkin bo'lsada, ko'pchilik amaliy tizimlar kamida uch xil qatlamdan iborat:



3 – rasm. Oddiy neyron tarmoq tushulishi

1. Kirish qatlami
2. Yashirin qatlam
3. Chiqish qatlami

Kirish qatlami neyronlari ma'lumotlarni kirish fayllaridan yoki bevosita elektron datchiklardan qabul qiladi. Chiqish qatlami esa axborotni tashqi muhitga, qo'shimcha kompyuter protsessoriga yoki boshqa qurilmaga uzatadi. Ushbu ikki qatlam orasida bir nechta yashirin qatlam bo'lishi mumkin; bu qatlamlardagi neyronlar har xil tarzda bog'langan bo'lib, har bir yashirin neyronning kirish va chiqishlari boshqa neyronlar bilan ulanadi.

Neyronlar orasidagi bog'lanishning yo'nalishi neyron tarmoqlarining muhim jihatlardan biridir. Aksariyat tarmoqlarda yashirin qatlamdagi har bir neyron avvalgi qatlamdagi barcha neyronlardan signallarni qabul qiladi va ko'pincha kirish qatlamidan ham signal oladi. Signallar ustida amal bajarilgach, neyron o'z chiqish signalini keyingi qatlamdagi barcha neyronlarga uzatadi – bu oldinga uzatish (feedforward) deb ataladi. Agar teskari aloqa mavjud bo'lsa, chiqish qatlamidagi neyronlarning chiqish signallari oldingi qatlamlarga qaytariladi. Neyronlar orasidagi ulanish turi tarmoqning ishlashiga katta ta'sir ko'rsatadi. Ko'pgina neyron tarmoqlari dasturiy paketlari foydalanuvchiga bog'lanishlarni ixtiyoriy ravishda qo'shish, o'chirish yoki boshqarish imkonini beradi. Doimiy ravishda moslashtiriladigan bog'lanish koeffitsiyentlari qo'zg'atuvchi ham, tormozlovchi ham bo'lishi mumkin.

Amaliy masalalarni yechishda neyron tarmoqlarni qo'llash.

Obrazlarni klassifikatsiya qilish. Bu vazifa – kirish obrazining (masalan, nutq signali yoki qo‘lda yozilgan belgi) belgi – vektori ko‘rinishida berilgan holda, uni oldindan belgilab qo‘yilgan bir yoki bir necha sinfga mansubligini aniqlashdan iborat. Mazkur usulning mashhur qo‘llanilishlariga harflarni tanish, tilni aniqlash, elektrokardiogramma signallarini tasniflash, qon hujayralarini ajratish kiradi.

Klasterlash (kategoriyalash). Klasterlash vazifasini yechishda o‘quv to‘plamida sinf yorliqlari bo‘lmaydi. Klasterlash algoritmi o‘xshash obrazlarni bir klasterga joylashtirish prinsipi asosida ishlaydi. Klasterlash ko‘pincha bilimlarni ajratib olish, ma‘lumotlarni siqish va ularning xususiyatlarini o‘rganishda qo‘llanadi.

Funksiyalarni approksimatsiya qilish. Faraz qilaylik, bizda o‘quv tanlov (ma‘lumotlar to‘plami) mavjud: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, ya‘ni kirish–chiqish juftliklari. Bu juftliklar shovqin ta‘sirida buzilgan noma‘lum R funksiyasi tomonidan generatsiya qilingan. Approksimatsiya vazifasi – ushbu noma‘lum funksiyaning E ko‘rinishdagi yaqinlashmasini topishdan iborat. Funksiya approksimatsiyasi ko‘plab ilmiy va muhandislik sohalarida modellashtirish masalalarini yechishda zarurdir.

Oldindan aytish (proгноzlash). Faraz qilaylik, bizda vaqtning ketma-ket lahzalarida olingan n ta diskret o‘lchovlar mavjud: $\{y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)\}$. Vazifa – keyingi lahzada $y(t_n + 1)$ qiymatini oldindan aytishdan iborat. Prognozlash biznes, ilm-fan va texnikada juda muhim ahamiyatga ega (masalan, fond bozoridagi narxlarni oldindan bilish, ob-havo prognozi).

Optimallashtirish. Matematika, statistika, texnika, fan, tibbiyot va iqtisodiyotdagi ko‘plab muammolar optimallashtirish masalalari sifatida ifodalanishi mumkin. Optimallashtirish algoritmining maqsadi – barcha cheklovlarga mos keluvchi, maqsad funksiyasini maksimal yoki minimal qiluvchi eng yaxshi yechimni topishdir.

Ma‘no bo‘yicha murojaat qilinadigan xotira. An‘anaviy kompyuterlarda xotiraga faqat aniq manzil orqali murojaat qilish mumkin, bu manzil xotira mazmuniga bog‘liq bo‘lmaydi. Manzil noto‘g‘ri hisoblangan taqdirda, butunlay boshqa ma‘lumot chaqirilishi mumkin. Assotsiativ xotira yoki ma‘no bo‘yicha murojaat qilinadigan xotira esa mazmun orqali qidirishga asoslanadi. Xotira mazmuni hatto qisman kirish yoki buzilgan ma‘lumot bo‘lsa ham esga chaqirilishi mumkin. Assotsiativ xotira multimedia axborot bazalarida qo‘llanishi mumkin.

Boshqaruv. Dinamik tizimni ko‘rib chiqamiz: $u(t)$ – boshqaruvchi kirish ta‘siri, $y(t)$ – tizimning shu t lahzadagi chiqish signali. Etalon modelga ega boshqaruv tizimlarida maqsad – tizim etalon model belgilagan kerakli trayektoriyada harakat qilishi uchun mos kirish signali $u(t)$ ni hisoblab topishdir. Bunga misol sifatida dvigatelning optimal boshqaruvini keltirish mumkin.

Shu bilan birga, neyron tarmoqlar ayrim sohalarda an‘anaviy hisoblash usullaridan ustunlikka ega bo‘lishiga qaramay, mavjud neyron tarmoqlari hali mukammal yechim darajasiga yetmagan.

Xulosa. Neyron tarmoqlar asosidagi o‘lchash tizimlari an‘anaviy algoritmlarga nisbatan yuqori darajadagi moslashuvchanlik va adaptivlikka ega bo‘lib, real vaqt rejimida ishlash qobiliyati bilan ajralib turadi. Bu esa sanoat avtomatikasi, elektronika, metrologiya, tibbiyot diagnostikasi, energetika, transport, atrof-muhit monitoringi va IoT tizimlaridagi aqlli sensorlarning rivojlanishida muhim ahamiyat kasb etadi. Yakuniy xulosa sifatida aytish mumkinki, neyron tarmoqlarni o‘lchash qurilmalariga integratsiya qilish ularning funksional imkoniyatlarini kengaytiradi, inson omili sababli yuzaga keladigan xatoliklarni kamaytiradi va o‘lchash jarayonlarining ishonchligini oshiradi. Kelgusida ushbu sohada yanada takomillashgan algoritmlar, chuqur o‘rganish modellaridan foydalanish va aqlli sensor tizimlarini yaratish orqali o‘lchash texnologiyalarining samaradorligini yuqori bosqichga olib chiqish imkoni mavjud.

ADABIYOTLAR:

1. Haykin, S. *Neural Networks and Learning Machines*. – New York: Pearson, 2016.
2. Bishop, C. *Pattern Recognition and Machine Learning*. – Springer, 2006.
3. Rumelhart, D., McClelland, J. *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. – MIT Press, 1986.
4. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. *Deep Learning*. – MIT Press, 2016.
5. Koren, Y. *Advanced Measurement Techniques*. – McGraw-Hill, 2014.
6. Zadeh L. A. *Neuro-Fuzzy Systems for Intelligent Measurement Applications*. – IEEE Transactions, 2005.
7. Simon, D. *Optimal State Estimation: Kalman, H_∞ and Nonlinear Approaches*. – Wiley, 2006.
8. O‘zDSt 8.009:2020. *O‘lchashlar birligini ta‘minlash. Asosiy tushunchalar*. – T.: O‘zstandart, 2020.

9. *O'zDSt ISO/IEC 17025:2019. Sinov va kalibrlash laboratoriyalarining vakolatligiga qo'yiladigan umumiy talablar.*
10. *O'zDSt 8.019:2006. O'lchash o'zgartkichlari. Umumiy texnik talablar.*
11. *Cherkashin, V. Metrologiya va o'lchash texnologiyalari. – Moskva: Energiya, 2018.*
12. *Suyunov, A., Umarov, B. Metrologiya asoslari. – Toshkent: Fan, 2019.*
13. *Osvalds, G. Intelligent Sensors and Measurement Systems. – CRC Press, 2017.*

**TASHKILOTLARDA BIZNES UZLUKSIZLIGINI BOSHQARISH TIZIMINI
MODELLASHTIRISH USULLARI**

*Turdimatov Mamirjon Mirzayevich,
Farg‘ona davlat texnika universiteti
“DI va kiberxavfsizlik” kafedrasida dotsenti
turdimatovmamir1958@gmail.com*

*Aliyev Muhammadali G‘ulomjon o‘g‘li,
Farg‘ona davlat texnika universiteti
“Axborot xavfsizligi” yo‘nalishi 1-kurs magistranti*

Annotatsiya. Ushbu tadqiqot tashkilotlarda Biznes uzluksizligini boshqarish tizimini (Business Continuity Management - BCM) loyihalash va modellashtirish usullariga qaratilgan. Ma‘lumki, zamonaviy raqamli iqtisodiyot sharoitida tashkilot jarayonlarining qisqa muddatga to‘xtab qolishi moliyaviy yo‘qotishlar, mijozlar ishonchining pasayishi va brend obro‘sining kamayishiga olib kelishi mumkin. Shu tufayli tadqiqot asosan risklarni aniqlash va BCMning nazariy va amaliy asoslari tadqiqi o‘rganilgan.

Kalit so‘zlar: biznes uzluksizligini boshqarish, BCM (Business Continuity Management), risk, risklarni boshqarish, biznesga ta‘sir tahlili (BIA), tiklash strategiyalari, favqulodda holatlar, tashkilot barqarorligi, raqamli iqtisodiyot, axborot tizimlari xavfsizligi, korporativ boshqaruv.

**МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОСТЬЮ
БИЗНЕСА В ОРГАНИЗАЦИЯХ**

Аннотация. Данное исследование посвящено методам проектирования и моделирования систем управления непрерывностью бизнеса (BCM) в организациях. Известно, что в условиях современной цифровой экономики кратковременное прерывание организационных процессов может привести к финансовым потерям, потере доверия клиентов и снижению репутации бренда. Поэтому исследование в основном сосредоточено на выявлении рисков и изучении теоретических и практических основ BCM.

Ключевые слова: управление непрерывностью бизнеса, BCM (Business Continuity Management), риск, управление рисками, анализ воздействия на бизнес (BIA), стратегии восстановления, чрезвычайные ситуации, организационная устойчивость, цифровая экономика, безопасность информационных систем, корпоративное управление.

**METHODS FOR MODELING BUSINESS CONTINUITY MANAGEMENT SYSTEMS IN
ORGANIZATIONS**

Abstract. This study focuses on methods for designing and modeling Business Continuity Management (BCM) systems in organizations. It is known that in the conditions of the modern digital economy, a short-term interruption of organizational processes can lead to financial losses, loss of customer trust, and a decrease in brand reputation. Therefore, the study mainly focuses on identifying risks and studying the theoretical and practical foundations of BCM.

Keywords: business continuity management, BCM (Business Continuity Management), risk, risk management, business impact analysis (BIA), recovery strategies, emergencies, organizational stability, digital economy, information systems security, corporate governance.

Kirish. Zamonaviy tashkilotlarning barqaror va samarali faoliyat yuritishi ularning ichki va tashqi jarayonlarining uzluksiz ishlashiga bevosita bog‘liq bo‘lib, bunda axborot tizimlari, ma‘lumotlar almashinuvi, texnologik infratuzilma, xizmat ko‘rsatish tarmoqlari va inson resurslari muhim o‘rin tutadi. Raqamli iqtisodiyot sharoitida har qanday xizmatning qisqa muddatga to‘xtab qolishi ham jarayonlarning izdan chiqishiga, mijozlar oqimini kamayishiga, moliyaviy yo‘qotishlar ortishiga va brend obro‘sining pasayishiga olib kelishi mumkin. Ayniqsa bugungi globallashtirilgan muhitda xavf omillari ko‘payib bormoqda: tabiiy ofatlar, texnik nosozliklar, elektr ta‘minotidagi uzilishlar, dasturiy xatoliklar, kiberhujumlar, ma‘lumotlar yo‘qolishi va xodimlarning tasodifiy xatolari tashkilotning uzluksiz ishlab turishiga real tahdid soladi. Bunday sharoitda tashkilotning favqulodda holatlarga tayyorligi nafaqat texnik choralar bilan, balki

puxta o'ylangan, oldindan rejalashtirilgan va muntazam sinovdan o'tkaziladigan boshqaruv tizimi bilan ta'minlanadi.

Biznes uzluksizligini boshqarish tizimi (Business Continuity Management — BCM) tashkilotning faoliyatini himoya qilish, yuzaga kelgan uzilishlardan minimal zarar bilan chiqish va iloji boricha qisqa vaqt ichida qayta tiklanishni ta'minlashga qaratilgan kompleks mexanizmdir. BCMning asosiy vazifasi favqulodda holat yuz berganda biznes jarayonlarini to'xtatmasdan davom ettirish uchun zarur bo'lgan strategiyalar, resurslar va amaliy choralarni oldindan belgilashdan iboratdir. Bu tizim nafaqat axborot texnologiyalari bilan bog'liq jarayonlarni, balki tashkilotning barcha bo'limlari faoliyatini o'z ichiga oladi: boshqaruv, moliya, logistika, kommunikatsiya, xavfsizlik va inson resurslari[1-3].

Ilmiy-uslubiy yondashuvlar BCMning nazariy asoslari bilan birga real amaliyotda qo'llanilishi mumkin bo'lgan aniq mexanizmlarni ham taqdim etadi. Gap shundaki, biznes uzluksizligini boshqarish oddiy favqulodda vaziyat rejasi emas, balki tashkilotning umumiy boshqaruv tizimiga integratsiyalashgan, doimiy ravishda yangilanib boriladigan strategik jarayondir. Shu nuqtayi nazardan, mazkur tadqiqotning maqsadi mavjud metodik materiallar va hujjatlarni tahlil qilish orqali BCM tizimini loyihalash prinsiplari, funksional bosqichlari, amaliy talab va mexanizmlarini chuqur o'rganishdan iboratdir. Bu orqali BCMning zamonaviy tashkilotlar uchun naqadar muhim ekani va uni to'g'ri joriy etish biznes jarayonlarining davomiyligi, raqobatbardoshligi hamda xavf-xatarlarga bardosh berish qobiliyatini oshirishini ilmiy asosda yoritish ko'zda tutiladi[4-6].

Metodologiya va adabiyotlar tahlili. Mazkur tadqiqotning metodologik asosini biznes uzluksizligini boshqarish bo'yicha mavjud uslubiy qo'llanmalar, xalqaro standartlar, ilmiy adabiyotlar va amaliy qo'llaniladigan BCM modellari tahlili tashkil etdi. Tadqiqot jarayonida BCMning hayot sikli asosiy konseptual yadro sifatida olingan bo'lib, ushbu sikl risklarni aniqlash va baholash, biznesga ta'sir tahlili (BIA), strategik rejalashtirish, tiklash mexanizmlarini ishlab chiqish, hujjatlar yaratish, sinovlardan o'tkazish va tizimni muntazam ravishda yangilab borishni o'z ichiga olgan kompleks jarayon sifatida talqin qilindi.

Korporativ boshqaruvda risklarni boshqarish va risk darajasini pasaytirish yo'llari (Mallayev, S. (2025)). *Tijorat banklarida operatsion risklarini baholash va boshqarish tizimini tashkil qilish* (Rabbimov, J. (2025)). Tashkilotlarga bo'layotgan xavf-xatarlarni baholash va bartaraf etish usullarini tahlili (Turdimatov M.M., Baratova G.). *Aktsiyadorlik jamiyatlarida investitsion risklarni boshqarishning ilmiy-uslubiy asoslari* (Xasanov, H. (2024)). Korxonalar va tashkilotlarda axborot xavfsizligi risklarini baholash usullarini tahlili (Turdimatov M.M., Abdubannayev A. (2025)). *Korxonalarda risk boshqaruvi mexanizmlarini joriy etish va inson resurslaridan foydalanish istiqbollari takomillashtirish* (Tashpulatova, M. (2024)). *O'zbekiston Respublikasida infratuzilma loyihalarini amalga oshirishdagi risklarni boshqarish* (Yusupova, Z. (2025)).

BIA metodikasi doirasida tashkilotning eng muhim biznes jarayonlarini aniqlash, ularning o'zaro bog'liqligini xaritalash, jarayonlarning to'xtab qolishi oqibatida yuzaga keladigan moliyaviy va operatsion zararlarni baholash va har bir jarayon uchun ruxsat etilgan maksimal to'xtash vaqti (RTO) hamda tiklash nuqtasi maqsadi (RPO) aniqlab borildi. Bu jarayon BCMning keyingi barcha bosqichlari uchun poydevor bo'lib xizmat qildi.

Risklarni baholash bosqichida ehtimol-ta'sir modeli asosida xavf omillarining intensivligi aniqlanib, ular toifalarga ajratildi va ustuvorlik darajasi bo'yicha reytinglash amalga oshirildi. Ushbu yondashuv xavflar reestrining shakllanishiga va ularga nisbatan qaysi boshqaruv choralarni ko'rish zarurligini belgilab olishga imkon berdi. Tiklash strategiyasini ishlab chiqish jarayonida zaxira serverlar, muqobil ish joylari, bulut texnologiyalari, avtonom elektr ta'minoti, ma'lumotlarni replikasiya qilish texnologiyalari va xodimlarning o'zaro almashinuv tizimlari kabi texnik va tashkiliy yechimlardan foydalanish darajasi o'rganildi[5-7,10].

Tadqiqot davomida modellashtirish usuli yordamida turli favqulodda holatlar stsenariylari yaratilib, BCMning real faoliyatda qay darajada samarali ishlashi baholandi. Shuningdek, taqqoslama tahlil metodidan foydalanib, xalqaro standartlar - xususan ISO 22301 — talablari bilan mavjud uslubiy qo'llanmalar o'rtasidagi farq va o'xshashliklar aniqlab borildi. Tizimli yondashuv metodidan foydalanish esa tadqiqotning barcha bosqichlarini yagona mantiqiy struktura asosida o'rganishga imkon berdi. Ushbu metodlar yordamida BCMning amaliyotga tatbiq etish mexanizmlari chuqur tahlil qilindi va tashkilotlar uchun moslashuvchan, real sharoitga yo'naltirilgan yondashuvlar shakllantirildi.

Natijalar. Tadqiqot davomida olib borilgan tahlillar tashkilotlarda biznes uzluksizligini boshqarish tizimini samarali shakllantirish uchun zarur bo'lgan bir qator asosiy jarayonlar va ularning o'zaro bog'liqligini aniq ko'rsatdi. Eng avvalo biznesga ta'sir tahlili (BIA) orqali tashkilotning eng muhim funksiyalarini aniq ajratib olish mumkin bo'ldi. Tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, xizmat ko'rsatish jarayonlari, mijozlarga xizmat bilan bog'liq operatsiyalar, ma'lumotlarni qayta ishlash, texnik xizmatlar, infratuzilma boshqaruvi va axborot tizimlari kabi funksional yo'nalishlar har qanday uzilishdan eng ko'p

zarar ko‘rishi mumkin bo‘lgan jarayonlar qatoriga kiradi. Ushbu jarayonlar uchun ruxsat etilgan maksimal to‘xtash vaqti (RTO) va tiklash nuqtasi maqsadi (RPO) kabi mezonlarning aniqlanishi ularni qay darajada tez tiklash zarurligini ko‘rsatib berdi va tiklash strategiyasining asosiy tarkibiy qismiga aylandi. Shuningdek, BIA jarayonida aniqlangan bog‘lanishlar asosida bir jarayonning to‘xtashi boshqa jarayonlarga zanjirsimon ta’sir ko‘rsatishi mumkinligi ham aniqlandi, bu esa BCM strategiyasini yanada chuqurroq rejalashtirish zarurligini ko‘rsatdi.

Axborot xavfsizligi riskini baholash modeli oldingi tadqiqotlardan foydalangan holda tashkilotning axborot xavfsizligi riskini baholashning umumlashtirilgan modelini tuzish mumkin. Tashkilotning axborot xavfsizligi darajasini aniqlash uchun faqat bitta xavfning qiymatini hisoblashda tashkilotning axborot xavfsizligi darajasini aniqlash mumkin emas. Ammo, agar siz ma’lum bir blok uchun bir nechta xavf yoki xavfning qiymatlarini hisoblasangiz, masalan:

- xavfsizlik yo‘nalishi bo‘yicha (mavjudlikni ta’minlash);
- ATni ta’minlash bo‘yicha chora-tadbirlar bo‘yicha (ATni ta’minlash bo‘yicha tashkiliy chora);
- qimmatbaho aktiv uchun (tashkilot xodimlari);

Bunday holda siz tashkilotning axborot xavfsizligi darajasini hisoblashingiz mumkin. Buning uchun bizga kerak:

Quidagi formuladan foydalanib, umumiy xavf qiymatini hisoblash mumkin $R_{umum} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$ (1)

bu yerda R - parametrlar bloki bo‘yicha tashkilotning umumiy axborot xavfsizligi xavfi;

i - hisoblangan xususiy xavfning seriya raqami;

n - hisob-kitob qilingan xususiy risklarning umumiy soni.

Parametrlar bloki uchun umumiy xavfni hisoblash misoli quyidagi 1- jadvalda keltirilgan.

1- jadval. Blok uchun axborot xavfsizligining umumiy xavfini hisoblash parametrlari.

Xususi riskning ahamiyati	Parametrlar bloki uchun umumiy xavfning qiymati
Xavf №1	$R_{o6m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i = \frac{1}{7} 78 = 26$
Xavf №2	
Xavf №3	

Tashkilotning IS darajasining qiymatini aniqlang. Buning uchun axborot xavfsizligi darajasini baholash uchun ishlab chiqilgan matritsadan foydalanish mumkin (2-jadval va 3-jadval).

Tashkilotning axborot xavfsizligi darajasini baholashda uchta parametr hisobga olinadi, menimcha, tashkilotdagi axborot xavfsizligi darajasi quyidagilarga bog‘liq:

1. Parametrlar bloki uchun xavfning umumiy darajasi;
2. Tashkilotning umumiy tavakkalchilikning oldini olish xarajatlari (ular allaqachon sarflangan);
3. Axborot xavfsizligi xavfiga munosabat: uni qabul qilish, uzatish yoki kamaytirish.

2-jadval. Axborot xavfsizligini baholash matritsasi (1-qism)

Xavfga munosabat	Past xavf				O‘rtacha xavf			
	Axborot xavfsizligi xarajatlari				Axborot xavfsizligi xarajatlari			
	Yoqori	O‘rta	past	xarajat yo‘q	katta	orasida	past	xarajat yo‘q
Riskni o‘tkazish	10	9	8	7	9	8	7	6
Riskni kamaytirish	9	8	7	6	8	7	6	5
kardinal kamaytirish	8	7	6	5	7	6	5	4
Riskni qabul qilish	7	6	5	4	6	5	4	3

3-jadval. Axborot xavfsizligini baholash matritsasi (2-qism)

Xavfga munosabat	Yuqori xavf				Kritik xavf darajasi			
	Axborot xavfsizligi xarajatlari				Axborot xavfsizligi xarajatlari			
	Yoqori	O‘rta	past	xarajat yo‘q	katta	O‘rta	past	xarajat yo‘q
Riskdan qochish	8	7	6	5	7	6	5	4
Riskni	7	6	5	4	6	5	4	3

INFORMATICS

kamaytirish								
kardinal kamaytirish	6	5	4	3	5	4	3	2
Riskni qabul qilish	5	4	3	2	4	3	2	1

Taklif etilayotgan axborot xavfsizligi darajasi matritsasiga (2-jadval, 3-jadval) ko'ra, 10 yoki 9-darajaga ega bo'lgan tashkilot, agar 100% axborot xavfsizligini ta'minlashning iloji bo'lmasa, ishonchli himoyalangan deb hisoblanadi.

Tashkilotga 8, 7 yoki 6 daraja berilgan bo'lsa, axborot xavfsizligining o'rtacha darajasiga ega deb hisoblanadi.

Tashkilotga 5, 4 yoki 3 daraja berilgan bo'lsa, axborot xavfsizligining juda past darajasiga ega deb hisoblanadi.

Risk tahlili bosqichi orqali tashkilot faoliyatiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin bo'lgan xavf omillarining to'liq ro'yxati shakllantirildi. Tahlil natijalariga ko'ra, texnik nosozliklar, kiberhujumlar, elektr ta'minotidagi uzilishlar, server va ma'lumotlar bazasining ishdan chiqishi, ma'lumotlarning tasodifiy o'chirilib ketishi, inson xatoliklari va tabiiy ofatlar kabi xavflar eng ustuvor tahdidlar sifatida qayd etildi. Ehtimol-ta'sir modeli asosida ushbu xavflar reytinglash natijasida ularning aksariyatiga qaratilgan kamaytirish choralari ishlab chiqildi. Masalan, elektr ta'minoti uzilishi uchun uzluksiz quvvat manbalari (UPS) va avtonom generatorlar, ma'lumotlar yo'qolishi xavfi uchun esa bulutli saqlash tizimlari va doimiy replikasiya mexanizmlari joriy etish tavsiya qilindi[8,9].

Tahlil asosida ishlab chiqilgan tiklash strategiyasi ko'plab texnik va tashkiliy choralarni o'z ichiga oldi. Xususan, zaxira serverlar va virtualizatsiya texnologiyalari yordamida xizmatlarni tezkor qayta tiklash imkoniyati yaratildi, muhim ma'lumotlarni bulutda saqlash orqali ularni har qanday holatda tiklash kafolatlandi, aloqa kanallarining zaxira variantlari ishlab chiqildi va xodimlar uchun favqulodda holatlarda amal qilinadigan aniq yo'riqnomalar shakllantirildi. Tizimning haqiqatda qay darajada ishlashini baholash maqsadida o'tkazilgan sinovlar — stsenariy asosida modellashtirilgan mashqlar, texnik tiklash testlari, zaxira ish joylarida ishlash bo'yicha trening mashg'ulotlari — rejaning kuchli va zaif tomonlarini aniqlashga yordam berdi. Sinovlar jarayonida aniqlangan kamchiliklar asosida reja takomillashtirildi va jarayonlar o'rtasidagi muvofiqlashtirish yanada kuchaytirildi[10].

Natijalar shuni ko'rsatdiki, BCM tizimi tashkilotda puxta ishlab chiqilgan va real stsenariylar asosida tekshirib boriladigan bo'lsa, u favqulodda holatlarda jarayonlarning to'xtab qolish vaqtini sezilarli darajada kamaytiradi va iqtisodiy yo'qotishlarning oldini oladi. Umuman olganda, tadqiqot BCMning barcha bosqichlari o'zaro uyg'un va tizimli bajarilganda, tizim tashkilotning favqulodda vaziyatlarga tayyorligini tubdan oshiruvchi samarali boshqaruv vositasi ekanini tasdiqladi.

Muhokama. Tadqiqot jarayonida olingan natijalar biznes uzluksizligini boshqarish (BCM) tizimi doimiy takomillashtirib borilishi zarur bo'lgan dinamik jarayon ekanini yana bir bor isbotladi. BCM faqatgina bir martalik reja yoki favqulodda vaziyatda qo'llaniladigan choralarni majmuasi emas, balki tashkilotning har bir bo'limi bilan uzviy bog'liq holda ishlaydigan, muntazam ravishda yangilanadigan boshqaruv tizimidir.

Har bir sinov, trening yoki modellashtirilgan ssenariy natijasida aniqlangan xatoliklar tizimni real holatlarga moslashtirishga yordam beradi, holatlarning o'zgaruvchan tabiatini hisobga olib, rejaning qayta ko'rib chiqilishi va dolzarb holga keltirilishi esa BCMning amaliy samarasini oshiradi. Tadqiqot shuni ko'rsatdiki, axborot xavfsizligi, IT infratuzilmasi, yuqori darajadagi boshqaruv, inson resurslari va kommunikatsiya bo'limlarining o'zaro muvofiqlashtirilgan ishlashi BCMning muvaffaqiyat kaliti hisoblanadi; aks holda tizimning alohida bo'limlari yaxshi ishlasa ham, umumiy uzluksizlikni ta'minlashda bo'shliqlar yuzaga keladi.

BCMning iqtisodiy jihatdan katta ahamiyatga ega ekanligi ham tadqiqot natijalarida yaqqol ko'rindi — uzilishlarning oldini olish yoki ularni qisqa muddatda bartaraf etish nafaqat zararlarni kamaytiradi, balki tashkilotning raqobatbardoshligini saqlash, mijozlar ishonchini mustahkamlash va brend obro'sini himoya qilishda ham muhim rol o'ynaydi. Shuningdek, BCMning moslashuvchan metodikasi uni nafaqat yirik korxonalar, balki kichik va o'rta biznes subyektlari, davlat tashkilotlari, ta'lim muassasalari va boshqa ijtimoiy soha institutlarida ham samarali qo'llash imkonini beradi.

Bu tizimning universalligi uni har bir tashkilotning o'ziga xos ehtiyojlari va resurslariga moslab modifikatsiya qilish imkoniyatida namoyon bo'ladi. Xulosa qilib aytganda, BCMning uzluksiz rivojlanishi, texnologik innovatsiyalar bilan uyg'unlashtirilishi va amaliyotga muntazam tatbiq etib borilishi uning haqiqiy samaradorligini ta'minlaydigan eng muhim omillardir.

Xulosa. Yakuniy xulosalarga ko‘ra, biznes uzluksizligini boshqarish tizimini to‘g‘ri loyihalash tashkilotning umumiy barqarorligini ta‘minlashda strategik ahamiyatga ega bo‘lgan omil sifatida namoyon bo‘ladi. Tadqiqot jarayonida aniqlanganidek, risklarni erta aniqlash, biznesga ta‘sir tahlilini to‘liq o‘tkazish, tiklash strategiyalarini puxta ishlab chiqish va rejalarni real sharoitlarga moslab muntazam sinovdan o‘tkazish BCMning asosiy poydevor elementlari bo‘lib, ushbu bosqichlar uzviy va izchil amalga oshirilganda tashkilot har qanday favqulodda vaziyatdan minimal yo‘qotish bilan chiqish imkoniyatiga ega bo‘ladi.

BCM tizimining samarali joriy etilishi nafaqat iqtisodiy xavfsizlikni mustahkamlaydi, balki tashkilotning obro‘-e‘tiborini himoya qiladi, mijozlar ishonchini saqlab qoladi va bozor raqobatida barqaror pozitsiyani qo‘llab-quvvatlaydi. Zamonaviy texnologiyalar, bulutli yechimlar, avtomatlashtirilgan tiklash tizimlari va xavfsizlik standartlari bilan uyg‘un integratsiya qilinishi BCMning amaliy samaradorligini sezilarli darajada oshiradi. Shuningdek, xodimlarning muntazam tayyorlanishi, treninglar va favqulodda vaziyat bo‘yicha mashg‘ulotlarning olib borilishi tizimning har doim ishga tayyor holatda bo‘lishini ta‘minlaydi.

Tadqiqot shuni ko‘rsatdiki, BCM metodikasi o‘zining moslashuvchan tuzilishi va universalligi sababli yirik korxonalaridan tortib ta‘lim muassasalari, davlat idoralari va kichik biznes subyektlarigacha bo‘lgan keng doiradagi tashkilotlarda muvaffaqiyatli qo‘llanishi mumkin. Xulosa qilib aytganda, BCMni joriy etish tashkilotning xavfsizlik madaniyatini mustahkamlovchi, kelajakdagi xavf va tahdidlarga nisbatan chidamliligini oshiruvchi, uzoq muddatli barqaror rivojlanishni ta‘minlovchi muhim boshqaruv mexanizmidir.

ADABIYOTLAR:

1. Mallayev, S. (2025). *Korporativ boshqaruvda risklarni boshqarish va risk darajasini pasaytirish yo‘llari*. // *Yashil Iqtisodiyot va Taraqqiyot*, 3(2).
2. Rabbimov, J. (2025). *Tijorat banklarida operatsion risklarini baholash va boshqarish tizimini tashkil qilish*. // *Yashil Iqtisodiyot va Taraqqiyot*. green-eco.uz
3. Turdimatov M.M., Baratova G. *Tashkilotlarga bo‘layotgan xavf-xatarlarni baholash va bartaraf etish usullarini tahlili*. TATU Samarqand filiali “Zamonaviy axborot, kommunikatsiya texnologiyalari va AT-ta‘lim tatbiqi muammolari” Respublika ilmiy- amaliy anjumani. Noyabr, Samarqand-2021 yil.
4. Xasanov, H. (2024, noyabr 11). *Aktiyadorlik jamiyatlarida investitsion risklarni boshqarishning ilmiy-uslubiy asoslari*. // *Yashil Iqtisodiyot va Taraqqiyot*, 2(4).
5. Turdimatov M.M., Abdubannayev A. *Korxonalar va tashkilotlarda axborot xavfsizligi risklarini baholash usullarini tahlili*. (2025). // *Research and Implementation*, 3(5), 20–26.
6. Tashpulatova, M. (2024, iyun 25). *Korxonalarda risk boshqaruvi mexanizmlarini joriy etish va inson resurslaridan foydalanish istiqbollarini takomillashtirish*. // *Yashil Iqtisodiyot va Taraqqiyot*, 2(6).
7. Yusupova, Z. (2025). *O‘zbekiston Respublikasida infratuzilma loyihalarini amalga oshirishdagi risklarni boshqarish*. *Green Economy and Development* // *Yashil Iqtisodiyot va Taraqqiyot*. green-eco.uz
8. Baymirzaev, D. (2025). *Agrar korxonalar xo‘jalik faoliyatida risklarni boshqarish bo‘yicha samarali boshqaruv qarorlarini qabul qilishning metodologik asoslari*. // *Yashil Iqtisodiyot va Taraqqiyot*.
9. Abbas Isroil o‘g‘li, Y., & Safarova, N. A. (2023). *Biznesda risklarni boshqarish*. *Ilm-fan va Innovatsiya Ilmiy-Amaliy Konferensiyasi*, 2(05), 19–20.
10. Turdimatov M.M., Aliyev M.G’. *Tashkilotlarda biznes uzluksizligini boshqarish tizimini loyihalash dasturini ishlab chiqish*. // *Research and, Implementation*, 3(11), 292–296. <https://rai-journal.uz/index.php/rai/article/view/1785>

**UNIVERSITET HISOBLASH TARMOG‘I ZAIFLIK KO‘RSATKICHLARINI
MODELLASHTIRISHGA ASOSLANGAN AXBOROT XAVFSIZLIGI TIZIMI**

Kabulov Anvar Vasilovich,

O‘zbekiston milliy universiteti

Axborot xavfsizligi kafedrasida professor, t.f.d.

anvarkabulov@mail.ru

O‘rinov Nodirbek Toxirjonovich,

Andijon davlat universiteti

Dasturiy injiniringi kafedrasida dotsenti

nodirbekurinov1@gmail.com

Annotatsiya. Taqsimlangan hisoblash tarmog‘i uchun axborot xavfsizligi tizimini shakllantirishning ikki bosqichli metodikasi taklif etiladi. Birinchi bosqichda ehtimollar nazariyasiga asoslangan matematik model yordamida zaiflik koeffitsiyenti aniqlanadi. Ushbu koeffitsiyent axborotlashtirish obyektining tarmog‘i axborot xavfsizligi darajasini miqdoriy baholash hamda xavflarning ruxsat etilgan va tanqidiy chegaralarini belgilashga xizmat qiladi. Ikkinchi bosqichda taqsimlangan hisoblash tarmog‘i resurslari Proxmox VE virtualizatsiya tizimi asosida tashkil etilib, xostlarga Suricata IPS joylashtiriladi va Splunk SIEM tizimi bilan integratsiya qilinadi. Virtual muhitda tarmoq qurilmalari va axborot xavfsizligi komponentlarini imitasion modellashtirish orqali himoyalangan taqsimlangan hisoblash tarmog‘i modeli quriladi. Natijada taklif etilgan metodika zaiflik darajasini aniqroq baholash va axborot xavfsizligi tizimini asoslangan ravishda loyihalash imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: axborot xavfsizligi, axborotlashtirish obyekt, taqsimlangan hisoblash tarmog‘i, matematik model, zaiflik koeffitsiyenti, virtualizatsiya, IDS, SIEM.

**СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УЯЗВИМОСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ
УНИВЕРСИТЕТА**

Аннотация. Предлагается двухэтапная методика формирования системы информационной безопасности для распределённой вычислительной сети. На первом этапе с использованием математической модели, основанной на аппарате теории вероятностей, определяется коэффициент уязвимости. Данный коэффициент служит для количественной оценки уровня информационной безопасности сети объекта информатизации, а также для определения допустимых и критических порогов угроз безопасности. На втором этапе ресурсы распределённой вычислительной сети организуются на базе системы виртуализации Proxmox VE, на хостах развёртывается система Suricata IPS, и осуществляется интеграция с системой Splunk SIEM. В виртуальной среде путём имитационного моделирования сетевых устройств и компонентов информационной безопасности формируется модель защищённой распределённой вычислительной сети. В результате предложенная методика позволяет более точно оценивать уровень уязвимости и обоснованно проектировать систему информационной безопасности.

Ключевые слова: информационная безопасность, объект информатизации, распределённая вычислительная сеть, математическая модель, коэффициент уязвимости, виртуализация, IDS, SIEM.

**INFORMATION SECURITY SYSTEM BASED ON MODELING OF VULNERABILITY
INDICATORS OF UNIVERSITY COMPUTER NETWORK**

Abstract. A two-stage methodology for designing an information security system for a distributed computing network is proposed. In the first stage, a vulnerability coefficient is determined using a mathematical model based on probability theory. This coefficient is used to quantitatively assess the information security level of the informatization object's network and to define the permissible and critical thresholds of security threats. In the second stage, the resources of the distributed computing network are organized on the basis of the Proxmox VE virtualization platform, Suricata IPS is deployed on the hosts, and integration with the Splunk SIEM system is implemented. In a virtual environment, a protected distributed

computing network model is constructed by means of simulation of network devices and information security components. As a result, the proposed methodology makes it possible to more accurately assess the vulnerability level and to design the information security system on a well-founded basis.

Keywords: *information security, informatization object, distributed computing network, mathematical model, vulnerability coefficient, virtualization, IDS, SIEM.*

Kirish. Kompaniyalar axborotlashtirish obyektlari axborot xavfsizligiga tahdidlar landshafti uzluksiz o'zgarib borayotgan, shuningdek, kompyuter zararli dasturlari (kompyuter xakerlari)ning taktika va strategiyalari takomillashib borayotgan sharoitda axborot xavfsizligi bo'yicha mutaxassislar ko'pincha axborotni himoya qilish tizimlari ishining samaradorligi va ishonchligiga tayanadilar. Bunday axborotni himoya qilish tizimlarining asosiy vazifasi axborot tizimlaridan tashqariga axborotning (odatda maxfiy ma'lumotlarning) sizib chiqishiga yo'l qo'ymaslikdan iborat. Qator tadqiqotlarda ko'rsatilganidek [1], axborot sizib chiqishi bilan bog'liq axborot xavfsizligi hodisalarining aksariyati xodimlarning xatolari bilan bog'liq [2]. Sizib chiqishlarning taxminan 25% qismi xakerlar [3], insayderlar yoki axborot tizimlari foydalanuvchilarining yomon niyatli harakatlari natijasida yuzaga keladi.

Insayderlar ham, tashqi buzuvchilar ham axborot xavfsizligi vositalarini (yoki axborotni himoya qilish tizimini – axborotni himoya qilish tizimlarini) chetlab o'tishga intilishi tabiiy. Bu, ayniqsa, nishonga olingan (maqsadli) hujumlar sharoitida dolzarbdir. Hujum qiluvchi tomon va himoya tarafining bunday qarama-qarshiligining natijasi ko'plab omillarga bog'liq. Natijada, axborotlashtirish obyekti axborot xavfsizligi tizimi (keyingi o'rinlarda AXT) qay darajada mukammal bo'lmasin, himoya muvaffaqiyatiga oldindan kafolat berib bo'lmaydi.

Shuni ham ta'kidlash kerakki, hujumlar soni [4] hamda ularning murakkabligi [5] ortib borar ekan, zamonaviy ko'p bosqichli axborotni himoya qilish tizimlari boshqa qo'shimcha vazifalarni ham hal etishga xizmat qiladi [6]. Bunday qo'shimcha vazifalarga quyidagilarni kiritish mumkin: axborot tizimlari ichida ham, tashqariga ham keraksiz jo'natmalarni oldini olish; xodimlarning axborot tizimlari resurslaridan shaxsiy maqsadlarda foydalanish holatlariga yo'l qo'ymaslik; axborotlashtirish obyektlari va/yoki uning axborot tizimlari taqsimlangan hisoblash tarmog'ida tarmoq trafiginini monitoring qilish va ma'lumot uzatish kanallari yuklamasini optimallashtirish; xodimlar yoki begona shaxslarning keraksiz axborotni (masalan, spam yoki ortiqcha hajmdagi ma'lumot) uzatishga bo'lgan urinishlarini cheklash; jo'natilayotgan xabarlarini arxivlash, bu esa, masalan, axborot xavfsizligi bo'yicha hodisani chuqurroq tahlil qilish zarur bo'lgan holatlarda muhim ahamiyatga ega; xodimlarning ish joylarida bo'lishini nazorat qilish [7].

Agar axborot xavfsizligini tashqi buzuvchilardan himoya qilish haqida gapiradigan bo'lsak, bugungi kunda hujumlarni aniqlash tizimlari ko'plab kompaniyalar va tashkilotlarning taqsimlangan hisoblash tarmog'i axborot xavfsizligi konturining ajralmas qismiga aylangan. Bunda odatda bostirib kirishni aniqlash tizimlari (Intrusion Detection System, IDS) va bostirib kirishni oldini olish tizimlari (Intrusion Prevention System, IPS) yoki IDS/IPSning integrallashgan yechimlaridan foydalaniladi. Oxirgi holatda IDS/IPS tizimlari dasturiy-apparat majmuasi sifatida tarmoqni ruxsatsiz kirishdan himoya qilishga xizmat qiladi.

Axborotlashtirish obyektlari tarmog'ida axborot xavfsizligini ta'minlashning tizimli yondashuvini amalga oshirish uchun faqat axborotni himoya qilishning texnik vositalari arsenalidan foydalanish kifoya emas. Bunday axborotni himoya qilish tizimlarini loyihalash bosqichidayoq ilmiy usullardan foydalanish zarur. Bunday ilmiy usullarga, masalan, muayyan axborotlashtirish obyektlari uchun axborot xavfsizligi tizimlari va jarayonlarini matematik yoki imitasion modellashtirish kiradi. Bunday modellashtirishning asosiy maqsadi – axborotlashtirish obyektlari axborot xavfsizligi tizimini boshqarish bilan bog'liq optimal qarorlarni topishdan iborat. Shu bilan birga, odatda qo'shimcha vazifalar ham yuzaga keladi, masalan, yuqorida tilga olingan IDS/IPS kabi ma'lum axborot xavfsizligi mexanizmlaridan foydalanish samaradorligini baholash.

Muayyan axborotlashtirish obyektlari uchun axborotni himoya qilish tizimlarini modellashtirish jarayonining o'zini shartli ravishda ikki tarkibiy qismga bo'lish mumkin:

- matematik, fizik yoki imitasion modellarning o'zini yaratish;
- axborotni himoya qilish tizimlarining zarur tavsiflarini olish maqsadida ushbu modellardan foydalanish (ularni ishga tushirish).

Yuqorida keltirilganlarning barchasi tadqiqot mavzusining dolzarbligini belgilab berdi. Xususan, axborotlashtirish obyektlari zaiflik ko'rsatkichlarini matematik va imitasion modellashtirish asosida taqsimlangan hisoblash tarmog'i axborot xavfsizligi tizimini shakllantirish metodikasini ishlab chiqish zarurati yuzaga keldi.

Adabiyotlar tahlili. Ma'lum bir axborotlashtirish obyekti uchun axborot xavfsizligi tizimini yaratish haqida so'z borganda, odatda himoya tomoni ikki xil vaziyatdan biriga duch keladi.

Birinchi holatda axborotlashtirish obyektlari uchun axborot xavfsizligi tizimini “nol nuqtadan”, ya’ni butunlay yangidan yaratish talab etiladi. Amalda bunday holatda axborot xavfsizligi tizimi himoya obyektida mavjud bo’lgan yechimlarga tayanmagan holda va axborotlashtirish obyektlarida axborot xavfsizligini ta’minlashga kompleks yondashuv zarurligini to’liq anglamagan holda loyihalanadi.

Ikkinchi holatda esa axborotlashtirish obyektlarida allaqachon ma’lum darajada axborot xavfsizligi vositalari mavjud bo’ladi. Bu vaziyatda himoya tomoni oldida ushbu tizim samaradorligini oshirish vazifasi turadi. Masalan, bunga axborot xavfsizligi tizimi (axborotni himoya qilish tizimlari) tarkibini optimallashtirish hisobiga erishish mumkin. Yoki mavjud vositalarni axborotlashtirish obyektlaridagi eng qimmatli axborot aktivlarini himoya qilishga qayta taqsimlash orqali. Amaliyotda aynan shu ikkinchi variant ancha ko’p uchraydi [8].

Kiberhujumlar bo’yicha ijobiy bo’lmagan statistik ma’lumotlarga qaramasdan [9], ko’pincha axborotlashtirish obyektlari rahbariyati axborot xavfsizligi masalalariga yetarlicha e’tibor bermaydi [10] — toki o’zining axborot aktivlarini yetarli darajada himoya qilmagani yoki umuman himoya mavjud emasligi oqibatida kelib chiqqan muammolarga bevosita duch kelmaguncha [11].

Biroq, agar axborotlashtirish obyektlari rahbarlari noto’g’ri tashkil etilgan axborot xavfsizligi holati oqibatida yuzaga kelgan aniq muammolarga duch kelsa [12], ular axborot xavfsizligi yo’nalishiga sezilarli miqdorda moliyaviy investitsiya ajratishga tayyor bo’ladilar. Bunday vaziyatlarning takrorlanishiga yo’l qo’yimaslik ustuvor vazifaga aylanadi [13].

[14] da ta’kidlanganidek, axborotlashtirish obyektlarida axborot xavfsizligining belgilangan darajasiga erishish o’zaro bog’liq vazifalar majmuasini muvaffaqiyatli hal etishga bog’liq. Bunday vazifalarga, masalan, axborot xavfsizligi tizimini (axborotni himoya qilish tizimlarini) ishlab chiqish va joriy etish jarayonida yechiladigan texnik-texnologik, moliyaviy, tashkiliy va boshqa turdagi masalalar kiradi.

Shunday qilib, yuqorida keltirilganlarga tayangan holda, zamonaviy axborotlashtirish obyektlari larning ko’pchiligi uchun ajralmas tarkibiy qism bo’lgan taqsimlangan hisoblash tarmog’i zaiflik ko’rsatkichlarini modellashtirishga asoslangan axborot xavfsizligi tizimini shakllantirish metodikasini ishlab chiqish masalasi dolzarb bo’lib qolayotganini ta’kidlash mumkin.

Tadqiqot metodologiyasi. Taqsimlangan hisoblash tarmog’i zaiflik ko’rsatkichlarini modellashtirishga asoslangan axborot xavfsizligi tizimini shakllantirish metodikasini, shuningdek axborotlashtirish obyektlari tarmog’ining zaiflik koeffitsiyentini tavsiflovchi modelni ishlab chiqish.

Tadqiqot natijalari. Ma’lum bir axborotlashtirish obyektlari uchun qaysi axborot xavfsizligi tizimlarini tanlash masalasini hal etish uchun axborot xavfsizligi tahdidlarining yuzaga kelishiga oid yagona dinamik koeffitsiyentni ko’rib chiqish zarur [15]. Ushbu koeffitsiyent $P^{DT} \in [0; 1]$ tahdidlar dinamikasini, masalan axborotlashtirish obyektlarining taqsimlangan hisoblash tarmog’isi uchun, hisobga olishga imkon beradi, shuningdek taqsimlangan hisoblash tarmog’i uchun tahdidlar ehtimolligini modellashtirishda qo’llaniladi.

Odatda, ma’lum vaqt oralig’ida faoliyat yuritadigan har bir tashkilot yoki kompaniyada axborot xavfsizligi insidentlari bo’yicha ma’lum statistik ma’lumotlar mavjud bo’ladi. Demak, tahdidlarning ro’yobga chiqishining statistik ehtimoli haqida gapirish mumkin, u $P_{stat} \in [0; 1]$ bilan ifodalanadi. Shuningdek, axborotlashtirish obyektlarining taqsimlangan hisoblash tarmog’isi uchun tahdidlarni ekspert baholash natijalariga tayanish mumkin, bunday baholash $P_{expert} \in [0; 1]$ ko’rinishida ifodalanadi.

[15] da taqsimlangan hisoblash tarmog’i uchun axborot xavfsizligi tahdidlarining dinamik komponentini ($DC \in [0; 1]$) ko’rinishida ko’rib chiqish taklif etilgan:

$$DC = \begin{cases} P_{stat}^{n-1} > P_{stat}^n, \left(\frac{P_{stat}^{n-1} - P_{stat}^n}{P_{stat}^n} \right); \\ P_{stat}^{n-1} \leq P_{stat}^n, \left(\frac{P_{stat}^{n-1} - P_{stat}^n}{P_{stat}^n} \right); \end{cases} \quad (1)$$

bu yerda (n) — masalan, axborotlashtirish obyektlarining taqsimlangan hisoblash tarmog’isi uchun axborot xavfsizligi tahdidlari bo’yicha statistik ma’lumotlar davrlari. Ma’lumotlar, masalan, SIEM tizimi yordamida axborot xavfsizligi hodisalarini monitoring qilish natijasida yoki IPS/IDS tizimlari ishiga oid ma’lumotlar asosida olinadi.

Keyingi bosqichda axborotlashtirish obyektlari taqsimlangan hisoblash tarmog’isi himoya elementlarini aniqlaymiz. Ushbu bosqichda, masalan, ekspert yordamida taqsimlangan hisoblash tarmog’i uchun zaifliklar va tahdidlar gistogrammalari tuziladi.

Tahdid ro’yobga chiqqan hollarda himoya tomoni favqulodda vaziyatga duch keladi. Bunday vaziyat tahdidlarni amalga oshirishning barcha mumkin bo’lgan oqibatlarini ko’rib chiqishni talab etadi. Masalan, bu axborotlashtirish obyektlari uchun ma’naviy, moddiy, axborot yo’qotishlari va shu kabilar bilan bog’liq bo’lishi mumkin.

Tahdidlarni amalga oshirish ehtimolining maksimal qiymatini P_{max}^{DT} , minimal qiymatini esa P_{min}^{DT} deb belgilaymiz. Buni quyidagicha talqin qilish mumkin:

- agar $P_n^{DT} > P_{max}^{DT}$ bo'lsa, ushbu tahdid, masalan axborotlashtirish obyektlarining taqsimlangan hisoblash tarmog'isi uchun, chuqurroq tahlil qilish zarur bo'lgan tahdidlar qatoriga kiritiladi; u avtomatik tarzda yuqori ustuvorlikka ega deb belgilanadi va uni bartaraf etish bo'yicha choralar ko'riladi;
- agar $P_{min}^{DT} > P_n^{DT} > P_{max}^{DT}$ bo'lsa, bu tahdid o'rta ustuvorlikka ega tahdid sifatida qaraladi;
- agar $P_n^{DT} > P_{min}^{DT}$ bo'lsa, bu tahdid past ustuvorlikka ega tahdid sifatida tavsiflanadi.

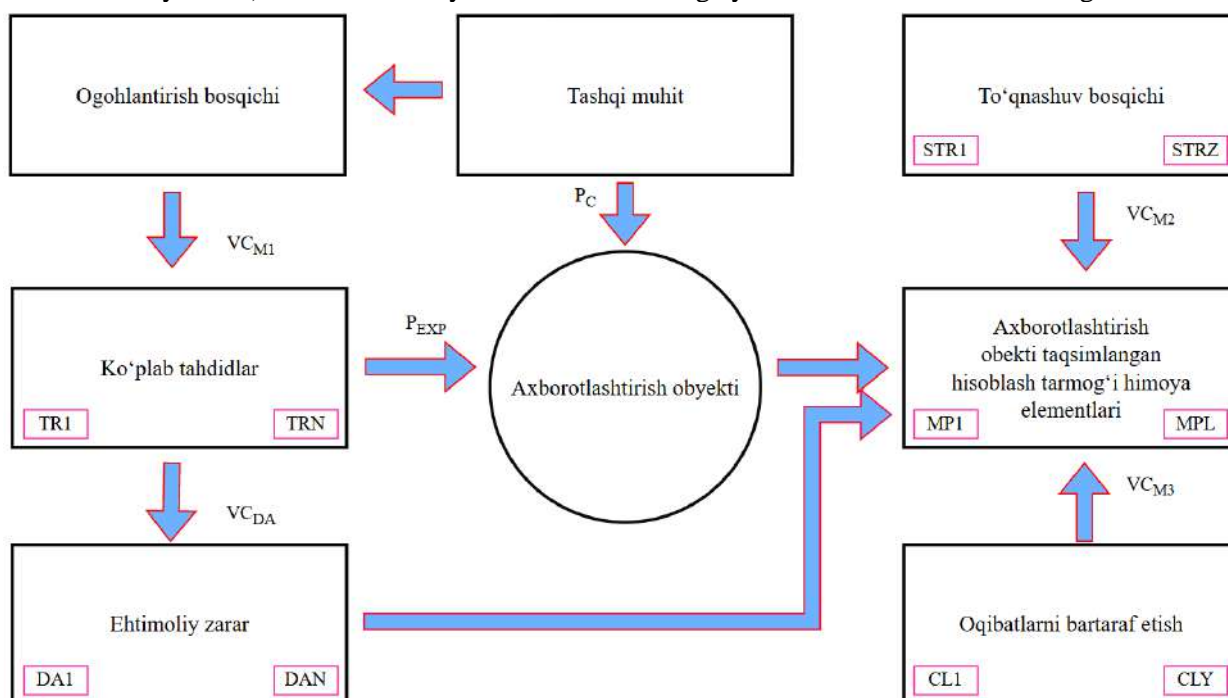
Demak, birinchi bosqichda axborotlashtirish obyektlari axborot xavfsizligi bo'limi xodimlari uchun tahdidlarni tahlil qilish va baholash, masalan taqsimlangan hisoblash tarmog'isi uchun axborotni himoya qilish tizimlari mavjud tarkibi doirasida tahdidlarni saralash (filtrlash) imkoniyati yaratiladi.

Endi taqsimlangan hisoblash tarmog'ining zaiflik koeffitsiyentini ko'rib chiqamiz.

Zaiflik tushunchasi ostida taqsimlangan hisoblash tarmog'ining ma'lum bir himoya elementi, masalan, brendmauening (firewall) tahdid ta'siriga beriluvchanlik xususiyati tushuniladi. Ya'ni ushbu axborot xavfsizligi tizimiga beqarorlashtiruvchi omillar ta'sir ko'rsatishi mumkin. Brendmauerga ta'sir etuvchi eng sodda beqarorlashtiruvchi omillar sifatida alohida quyidagilarni keltirish mumkin:

- Axborotlashtirish obyektlari taqsimlangan hisoblash tarmog'iga ishonchsiz ilovalardan kirish;
- RAW Socket'dan foydalanib axborotlashtirish obyektlari taqsimlangan hisoblash tarmog'iga kirish;
- Axborotlashtirish obyektlari taqsimlangan hisoblash tarmog'ining ishonchli jarayonlariga (processlariga) tashqi DLL modulini kiritish;
- Axborotlashtirish obyektlari taqsimlangan hisoblash tarmog'ining ishonchli jarayonlarida trojan oqimlarini yaratish;
- ishonchli jarayonlarning mashina kodini o'zgartirish;
- ishonchsiz jarayonni yashirish;
- va hokazo.

Axborotlashtirish obyektlari taqsimlangan hisoblash tarmog'ining zaiflik koeffitsiyentini joriy vaqt nuqtasida mavjud axborot xavfsizligi darajasining miqdoriy bahosi sifatida talqin qilish mumkin. Shu bilan birga, bunday baholash taqsimlangan hisoblash tarmog'ini hamda umuman axborotlashtirish obyektlarining real ish sharoitlari bilan uzviy bog'liq bo'ladi. taqsimlangan hisoblash tarmog'ini (yoki umuman axborotlashtirish obyektlari) zaiflik koeffitsiyentini shakllantirishga yondashuv 1-rasmda ko'rsatilgan.



1-rasm. Universitet tarmog'ini zaiflik koeffitsiyentini shakllantirishga yondashuv

Shunda taqsimlangan hisoblash tarmog'ini zaiflik koeffitsiyentini qiymatini (VC) [15] ish natijalarini hisobga olgan holda quyidagicha ifodalaymiz:

$$VC = \sum_{i=1}^N VC_i * \frac{\sum_j^M DC_{ij}}{\max \sum_j^M DC_{ij}} \quad (2)$$

bu yerda: VC_i – taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligi uchun i –tahdid yuzaga kelgan holatda zaiflik koeffitsiyenti qiymati; DC_{ij} – axborot xavfsizligi bo‘yicha i –tahdid yuzaga kelganida taqsimlangan hisoblash tarmog‘ining j –komponenti (masalan, axborot xavfsizligi vositalari) uchun zarar koeffitsiyenti qiymati; N – taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligi uchun tahdidlar soni; M – AX tizimi (axborotni himoya qilish tizimlari) elementlari ham kiritilgan holda taqsimlangan hisoblash tarmog‘i elementlarining soni.

Tahdidlarni bartaraf etish uchun odatda faqat tashkiliy choralar yetarli bo‘lmaydi. Samarali himoya, qoida tariqasida, axborotni himoya qilish texnik vositalarini xarid qilish, xodimlarni o‘qitish, yuqori malakali mutaxassislarni jalb qilish va hokazo yo‘nalishlarda moliyaviy investitsiyalarni talab qiladi.

Axborot xavfsizligi tizimlari sonini, ularning axborot xavfsizligining integral metrikalariga asoslangan texnik parametrlarini tanlash masalasini hal etish uchun axborotlashtirish obyektlari taqsimlangan hisoblash tarmog‘i uchun maqsad funksiyasi sifatida yillik keltirilgan xarajatlar qabul qilinadi:

$$C = p * \sum_{i=1}^n CE_i + \sum_{i=1}^m OC_i, \quad (3)$$

bu yerda: p – tahlil qilinayotgan axborotlashtirish obyektlari uchun taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligi bo‘yicha kapital qo‘yilmalarning nisbiy samaradorligini tavsiflovchi koeffitsiyent; CE_i, OC_i – mos ravishda taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligi bo‘yicha kapital (kapital xarajatlar) va ekspluatatsion (foydalanish) xarajatlarning i –moddasi; n, m – mos ravishda taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligiga oid kapital va ekspluatatsion xarajatlar tarkibiy qismlarining soni.

Modelni soddalashtirish maqsadida taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligi uchun yillik keltirilgan xarajatlar ushbu taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligi tizimiga investitsiyalar samaradorligini baholashning asosiy mezon sifatida qabul qilinadi. Bunday soddalashtirish modelning umumiy ishlash samaradorligini ko‘rsatishga imkon beradi. Maqsad funksiyasini (MF) hisoblash formulasining soddaligi taqsimlangan hisoblash tarmog‘i uchun optimal axborot xavfsizligi tizimlari tarkibini aniqlash masalasini yechishda model mosligini tahlil qilishni yengillashtiradi.

Taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligi uchun ma‘lum bir sinfga oid axborot xavfsizligi tizimini (masalan, brendmauer, IPS/IDS, SIEM va hokazo) sotib olish bilan bog‘liq xarajatlarni quyidagi funksiya ko‘rinishida ifodalaymiz:

$$CE_{1u} = a_1 + a_2 * IPI, \quad (4)$$

bu yerda: (IPI) – ma‘lum bir sinfga mansub axborot xavfsizligi tizimi samaradorligining integral ko‘rsatkichi (masalan, brendmauer, IPS/IDS, SIEM va boshqalar); $a_1 + a_2$ – chiziqli yaqinlashtirish uchun koeffitsiyentlar.

Xuddi shu tarzda taqsimlangan hisoblash tarmog‘i uchun boshqa axborot xavfsizligi tizimlari sinflarini sotib olish, o‘rnatish, ulash (masalan, axborotlashtirish obyektlari axborot tizimiga ulash, kirishni boshqarish vositalari va hokazo) bilan bog‘liq kapital xarajatlarni ham ifodalash mumkin.

Ekspluatatsion xarajatlar va cheklovlarni ham xuddi shunday yondashuv asosida ifodalash mumkin, [16, 17] ishlarda ko‘rsatilganidek, bu yerda yaqinlashtirish ifodalari majburiy ravishda chiziqli bo‘lmasligi mumkin.

Taklif etilgan metodikada taqsimlangan hisoblash tarmog‘i (yoki axborotlashtirish obyektlari) uchun axborot xavfsizligi tizimi tavsifini batafsil berish zarur bo‘lgan asosiy alohida mezonlar to‘plami CR kiritiladi:

$$CR = \{CR_1, CR_2, CR_3, CR_4, CR_5, \} \quad (5)$$

bu yerda: CR_1 , – ma‘lum sinfga mansub AX tizimi qiymati; CR_2 , – mos axborot xavfsizligi tizimi bilan qamrab olinadigan axborotlashtirish obyektlari axborot xavfsizligi bo‘yicha tahdidlar sinflari soni; CR_3 , – taqsimlangan hisoblash tarmog‘i uchun mos axborot xavfsizligi tizimi sinfi hisobiga kamayadigan (neytrallashadigan) risk miqdori; CR_4 , – mos axborot xavfsizligi tizimi uchun axborot xavfsizligi sertifikatlarining mavjudligi; CR_5 , – umumiy himoya majmuasida va axborotlashtirish obyektlari axborot xavfsizligi doirasida alohida axborot xavfsizligi tizimining moslashuvchanlik (mos keluvchanlik) ko‘rsatkichi.

Yuqorida keltirilgan alohida mezonlarning har biri 0 dan 1 gacha bo‘lgan oraliqda qiymat qabul qilishi mumkin. Masalan, CR_5 , uchun: agar ma‘lum bir axborot xavfsizligi tizimi himoyalangan taqsimlangan hisoblash tarmog‘i tugunida joylashgan boshqa vositalar bilan to‘liq mos bo‘lsa, $CR_5 = 1$, aks holda $CR_5 = 0$ deb qabul qilinadi. CR_1 mezonini uchun izoh quyidagicha bo‘lishi mumkin:

$$CR_1 = \begin{cases} 1, & \text{if } C_{ist} < C_{ist}^{max}; \\ 0,5 & \text{if } 0,5 * C_{ist}^{max} \leq C_{ist} \leq C_{ist}^{max}; \\ 0 & \text{if } C_{ist} > C_{ist}^{max}, \end{cases} \quad (6)$$

bu yerda: C_{ist} – tahlil qilinayotgan sinf doirasidagi axborot xavfsizligi tizimining (masalan, brendmauer, kirishni cheklash vositalari, bostirib kirishni aniqlash tizimlari va hokazo) haqiqiy qiymati; C_{ist}^{max} – shu sinf doirasidagi axborot xavfsizligi tizimining maksimal qiymati. CR_2 mezonini uchun izoh quyidagicha bo‘lishi mumkin:

$$CR_2 = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{i=1}^n m_{ISRii}^{istk} = |IST|; \\ 0,5 & \text{if } 0,5 * |IST| \leq \sum_{i=1}^n m_{ISRii}^{istk} \leq |IST|; \\ 0,25 & \text{if } 0 < \sum_{i=1}^n m_{ISRii}^{istk} \leq 0,5 * |IST| \\ 0 & \text{if } \sum_{i=1}^n m_{ISRii}^{istk} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

bu yerda: IST – taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligi uchun tahdidlar ko‘pligi (bu miqdor doimiy emas va tashqi omillarga bog‘liq); n – ma‘lum taqsimlangan hisoblash tarmog‘i uchun dolzarb tahdidlar soni; m_{ISRii}^{istk} – mavjud va rejalashtirilgan himoya vositalari hamda taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligi uchun dolzarb kiber-tahdidlarning qamrov (qayta qoplanish) matritsasi. CR_3 mezonini uchun izoh quyidagicha bo‘lishi mumkin [16]:

$$CR_3 = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_{i=1}^n R_{ISR} * m_{ISRii}^{istk} < R_a; \\ 0,5 & \text{if } R_a \leq \sum_{i=1}^n R_{ISR} * m_{ISRii}^{istk} \leq 0,5 * R_{cr}; \\ 0,25 & \text{if } 0,5 * R_{cr} \leq \sum_{i=1}^n R_{ISR} * m_{ISRii}^{istk} \leq R_{cr} \\ 0 & \text{if } \sum_{i=1}^n R_{ISR} * m_{ISRii}^{istk} \geq R_{cr}, \end{cases} \quad (8)$$

bu yerda: R_a, R_{cr} – mos ravishda axborotlashtirish obyektlari taqsimlangan hisoblash tarmog‘i uchun axborot xavfsizligi riskining ruxsat etilgan va kritik darajalari; n – ma‘lum taqsimlangan hisoblash tarmog‘i uchun dolzarb tahdidlar soni; m_{ISRii}^{istk} – mavjud va rejalashtirilgan axborot xavfsizligi tizimlari hamda axborot xavfsizligi tahdidlari uchun qamrov matritsasi.

Alohida mezonlar uchun shunga o‘xshash hisoblashlar ilmiy adabiyotlarda bir necha bor tasvirlangan (masalan, [10], [12]).

Shunda taklif etilgan alohida mezonlardan foydalanib, taqsimlangan hisoblash tarmog‘i uchun butun axborot xavfsizligi tizimi samaradorligini (EF) quyidagi vektor ko‘rinishida ifodalash mumkin:

$$EF = \{1,1,1,1,1\} \quad (9)$$

Aslida, bu ko‘rinishda taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligi tizimlari samaradorligini baholash uchun “etalon” alohida mezonlar to‘plamini olish mumkin.

Shunday qilib, yuqorida aytilganlarni hisobga olgan holda taqsimlangan hisoblash tarmog‘i zaiflik koeffitsiyentini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$VC = \sum_{j=1}^M \frac{EF [P_{expert(i)} * (P_{stat(i)} + DC_i)]}{\sum_j^M \alpha_{ij} * CEF_{ij}}, \quad (10)$$

bu yerda: α_{ij} – taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligiga nisbatan i -tahdidni bloklashning mos bosqichlarida taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligining j -vositasi ta‘sir darajasini tavsiflovchi og‘irlik koeffitsiyentlari; CEF_{ij} – taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligiga nisbatan i -tahdidni bloklashning mos bosqichlarida taqsimlangan hisoblash tarmog‘i axborot xavfsizligining j -vositasi (masalan, brendmauer, IPS/IDS, SIEM va hokazo) samaradorligini tavsiflovchi og‘irlik koeffitsiyentlari.

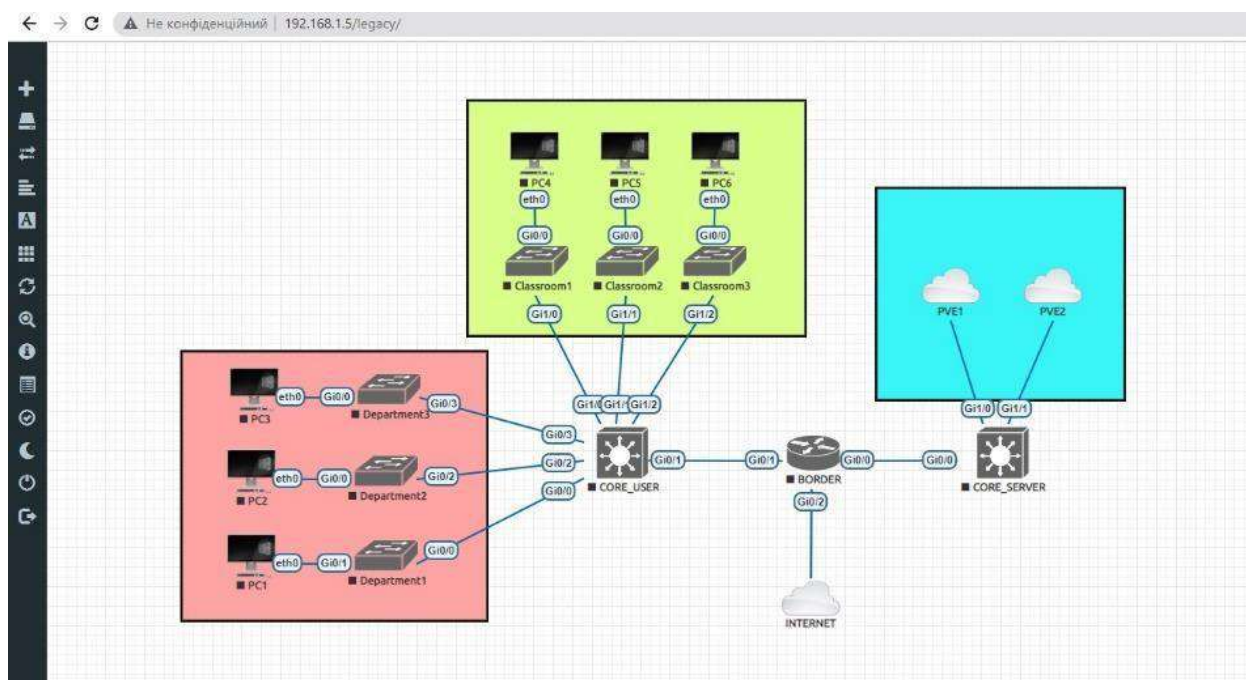
Taklif etilgan axborotlashtirish obyektlari axborot xavfsizligi tizimini shakllantirish metodikasining samaradorligini eksperimental tekshirish maqsadida shartli (virtual) axborotlashtirish obyektlari tarmog‘i loyihalandi. Kompyuterda Windows 11 operatsion tizimi o‘rnatilgan bo‘lib, unda VmWare Workstation platformasi ishlatildi. Kompyuterining o‘zi Intel Xeon E5 1650 server protsessoriga asoslangan bo‘lib, 64 GB tezkor xotira bilan jihozlangan; bu virtual mashinalar (VM) yaratish va tizimlarni modellashtirish amaliyotlari uchun yetarli hisoblanadi.

Jami 3 ta virtual mashina yaratildi, ulardan 2 tasi Proxmox VE operatsion tizimi tomonidan boshqarilib, boshqa virtual mashinalarni joylashtirish uchun gipervizor sifatida xizmat qiladi. Uchinchi

virtual mashinada Ubuntu Server operatsion tizimi oʻrnatildi. Shuningdek, ushbu VMda EVE-NG tarmoqlarni modellashtirish tizimi ham oʻrnatildi.

Infratuzilmani qulay boshqarish maqsadida klasterli yechimlardan foydalanildi. Bu bir nechta serverlarni bitta tizimga birlashtirish, resurslarni zaxiralash va markazlashtirilgan boshqaruvni taʼminlash imkonini berdi. Proxmox VE ushbu imkoniyatni qoʻllab-quvvatlagani sababli, 2 ta serverni bitta klasterga birlashtirish haqida qaror qabul qilindi. Klaster yaratilgandan soʻng istalgan host manziliga murojaat qilib, ikki server va ularning barcha resurslari (Vmlar, konteynerlar, saqlash qurilmalari va hokazo) haqida maʼlumotlarni koʻrish mumkin boʻldi. Klaster yaratish bir qator afzalliklarni berdi, ulardan biri – serverlardagi Vmlarni klasterning boshqa tugunlariga koʻchirish imkoniyati boʻlib, bu holat 2-rasmga koʻrsatilgan.

Yuqorida taʼkidlanganidek, tarmoq qurilmalarida axborotlashtirish obyektlari tarmogʻi modelini qurish uchun EVE-NG ilovasi qoʻllanildi. 1 ta marshrutizator (brendmauer funksiyasini ham bajaradi) va 2 ta yadroviy (core) kommutator qoʻshildi. Birinchi kommutator server segmenti, ikkinchisi esa foydalanuvchi segmenti uchun masʼul boʻldi. Shuningdek, foydalanuvchi segmenti uchun masʼul yadroviy kommutatorga ulangan kirish (access) kommutatorlari ham qoʻshildi.



2-rasm. Axborotlashtirish obyekti tarmogʻi diagrammasi

Shunga mos ravishda, ushbu ikki segmentdagi foydalanuvchilar uchun kirish siyosati turlicha deb qabul qilindi: menejment kommutatorlari orqali ulangan foydalanuvchilar axborotlashtirish obyektlari serverlarida joylashgan lokal resurslarga koʻproq kirish huquqlariga ega boʻladi, 2-rasmga qarang. Barcha qurilmalar VmWareʼning virtual interfeyslariga ulangan. VmWare interfeyslari esa oʻz navbatida shaxsiy kompyuterning tarmoq interfeysiga ulanadi. Kompyuterning oʻzi provayder tarmogʻiga ulangan marshrutizatorga ulab qoʻyilgan.

Axborotlashtirish obyektlari axborot xavfsizligining kompleks tizimini shakllantirish metodikasini tadqiq etish doirasida axborotlashtirish obyektlari tarmogʻi parametrlarini tashqi hujumlardan himoyalangan holatga oʻzgartirish qarori qabul qilindi. Yadro kommutatorlarini hamda ular bilan marshrutizator orasidagi aloqalarni rezervlash (rezervlashgan ulanishlarni tashkil etish) haqida qaror qabul qilindi. Buning uchun serverlardan va foydalanuvchi kirish kommutatorlaridan ikkala yadro kommutatoriga ham aloqalarni tashkil etish lozim boʻladi. Bugungi kunda aksariyat kirish kommutatorlarida bunday maqsadlar uchun 2–4 ta yuqori tezlikdagi portlar mavjud va serverlarda odatda kamida 2 portli tarmoq kartalari oʻrnatilgan boʻladi.

Marshrutizator va yadro kommutatorlarini oʻzaro bogʻlash uchun dinamik marshrutlash protokoli oʻrnatildi.

Keyin yadro kommutatorlarida virtual tarmoqlar (VLAN) yaratildi. Bu axborotlashtirish obyektlari resurslarini axborot xavfsizligini taʼminlash, kirishni cheklash va tarmoq trafiginu ichki kichik tarmoqlarga (subtarmoqlarga) boʻlish orqali segmentatsiya qilish imkonini berdi. Shuningdek, tarmoqdagi sikllar (loop) paydo boʻlishining oldini olish uchun kommutatorlarda STP protokoli sozlandi. Bundan tashqari, DHCP

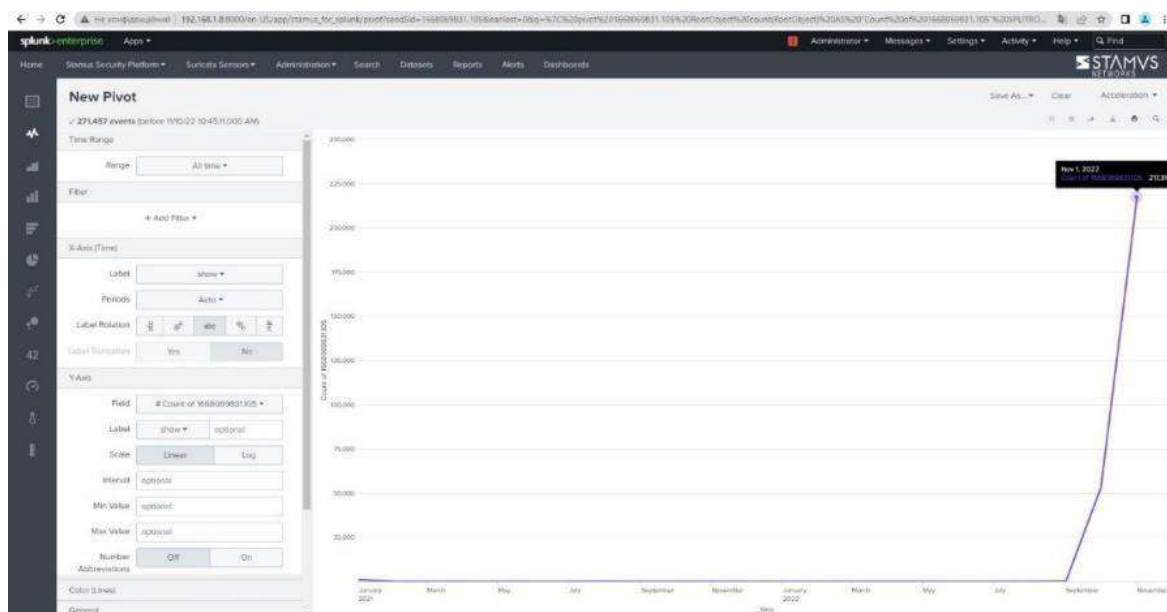
snooping, ARP paketlarini tekshirish, flood turidagi hujumlar uchun trafikni filtrdan o'tkazish funksiyalari yo'lga qo'yildi.

Axborotlashtirish obyektlari tarmog'ini yanada ishonchliroq himoya qilish maqsadida, uning ayrim tugunlarida xavfsizlikni ta'minlash va DNS manzillarini filtrlashdan tashqari, kiberhujumlarni aniqlash uchun tarmoq trafiginu tahlil qiluvchi alohida virtual mashinani (VM) ulash maqsadga muvofiq deb topildi. Bu maqsad uchun IPS Suricata o'rnatilgan Kali Linux (Debian) asosidagi alohida VM yaratish qarori qabul qilindi.

Axborotlashtirish obyektlari ning himoyalangan tarmog'i sozlash ishlari yakunlangach, tizimning ishlash samaradorligi sinovdan o'tkazildi. Buning uchun Pi-Hole o'rnatilgan VM barcha qurilmalarda hamda chegara (perimetr) marshrutizatorida asosiy DNS server sifatida ko'rsatildi. Pi-Hole ilovasi real vaqt rejimida qaysi so'rovlar bloklangani va qaysilariga ruxsat berilgani haqida ma'lumotlarni ko'rish imkonini berdi. Pi-Hole yordamida axborotlashtirish obyektlari axborot xavfsizligi administratori statistikasi diagramma ko'rinishida ko'rishi va ular bo'yicha batafsil ma'lumotlarni tahlil qilishi uchun qulay sharoit yaratildi.

Olingan natijalardan (3-rasmga qarang) ko'rinib turibdiki, virtual taqsimlangan hisoblash tarmog'i uchun sinovdan o'tkazilgan axborot xavfsizligi tizimi (taklif etilgan metodika asosida qurilgan) 5 soatlik ish davomida 3700 dan ortiq zararli so'rovlarni blokladi, bu esa axborotlashtirish obyektlari tarmog'iga kirayotgan jami trafikning 41 % dan ortig'ini tashkil etadi. Shunday qilib, axborotlashtirish obyektlari tarmog'i axborot xavfsizligini oshirish maqsadida IDS va SIEM tizimlaridan foydalanish bo'yicha qabul qilingan qarorlarning to'g'riligi tajriba asosida tasdiqlandi.

IDS Suricata va SIEM Splunk o'rnatilgach, SIEM tizimi IDS'dan tizim xabarlarini (loglar)ni olib boshladi. Atigi bir soat ichida sistema bo'yicha axborotlashtirish obyektlari axborot xavfsizligi qoidalarining buzilishi va tegishli trafikni bloklash haqida 20 ta xabar yuborildi. Bu esa bunday tizimlar axborotlashtirish obyektlari xavfsizlik konturi doirasida o'zini oqlashini xulosa qilish imkonini berdi.



3-rasm. IDS Suricata'dan olingan ogohlantirishlarning Splunk tizimida grafik ko'rinishida tasvirlanishi

Na faqat taqsimlangan hisoblash tarmog'i, balki umuman axborotlashtirish obyektlari bo'yicha axborot xavfsizligi darajasini baholashda ham ushbu matematik yondashuvdan foydalanish imkoniyatini alohida ta'kidlash joiz. Hozirgi bosqichdagi tadqiqotning kamchiligi sifatida taqsimlangan hisoblash tarmog'i yoki umuman axborotlashtirish obyektlari uchun tahdidlarning to'liq ro'yxati ko'rib chiqilmaganini qayd etish mumkin. Shuningdek, tajriba davomida tahdidlarni neytrallashtirish uchun tanlab olingan axborot xavfsizligi choralari ro'yxati ham cheklangan bo'lgan.

Muhokama. Ko'pgina zamonaviy axborot xavfsizligi obyektlarining hisoblash tizimlari yoki taqsimlangan hisoblash tizimlari o'z arxitekturasida murakkab elementlarning katta to'plamini birlashtiradi. O'z navbatida, bunday elementlarning har biri kompyuter hujumchilari tomonidan amalga oshiriladigan kiberhujumlarga nishon bo'lishi mumkin. Shunga mos ravishda, taqsimlangan hisoblash tarmog'i arxitekturasini tashkil etuvchi har bir element yetarlicha katta sonli kiber tahdidlarga duch keladi.

Mazkur tahdidlarning taqsimlangan hisoblash tarmog'ini axborot tizimlariga ko'rsatadigan ta'sirini kamaytirish, ayrim hollarda esa yetkazilishi mumkin bo'lgan zararni oldini olish maqsadida tarmoq arxitekturasiga turli xil axborotni himoya qilish vositalari integratsiya qilinadi. Yoki, potensial tahdidlarning xilma-xilligini inobatga olgan holda, axborot xavfsizligini ta'minlash bo'yicha chora-tadbirlar va vositalar majmui shakllantiriladi.

Taqsimlangan hisoblash tarmog'ini uchun axborot xavfsizligi vositalarini ko'paytirish, demakki, sarflanadigan resurslar, birinchi navbatda moliyaviy resurslar hajmini oshirish har doim ham kutilgan natijani bermasligi allaqachon isbotlangan. taqsimlangan hisoblash tarmog'ida qo'llaniladigan axborot xavfsizligi vositalari va chora-tadbirlari turli yo'nalishlarga qaratilgan bo'lishi mumkin. Masalan, bu zararli dasturiy ta'minotning muhim taqsimlangan hisoblash tarmog'ini tugunlariga kirib borishiga yo'l qo'ymaydigan axborot xavfsizligi vositalari bo'lishi mumkin. Yoki tizim administratorlari uchun butun taqsimlangan hisoblash tarmog'ini hamda uning alohida komponentlari ishini monitoring qilishga mo'ljallangan ommabop dasturiy mahsulotlar bo'lishi mumkin.

Axborot xavfsizligi tahdidlari landshafti uzluksiz o'zgarib borayotgani va taqsimlangan hisoblash tarmog'ini arxitekturasini murakkablashgani sari tahdidlar soni ortib borayotganini inobatga olsak, tarmoqlarning xavfsiz va ishonchli ishlashini ta'minlashga doir masalalar yanada ko'proq e'tibor va qo'shimcha tadqiqotlarni talab qiladi. Shu sababli taqsimlangan hisoblash tarmog'ini uchun axborot xavfsizligi tizimini shakllantirish bo'yicha taklif etilgan metodika va zaiflik koeffitsiyenti modeli axborotlashtirish obyektining taqsimlangan hisoblash tarmog'ini bo'yicha zaiflik darajalarini miqdoriy baholash imkonini berishi amaliy jihatdan asoslangan.

Xulosa. Shunday qilib, olib borilgan tadqiqotlar quyidagi natijalarga erishish imkonini berdi:

- Universitet hisoblash tarmog'ini (yoki taqsimlangan hisoblash tarmog'ini) uchun axborot xavfsizligi tizimini shakllantirish metodikasini aniqlashtirish bo'yicha takliflar ilgari surildi.
- Metodikaning birinchi bosqichida ehtimollar nazariyasi apparatiga tayangan holda matematik modellashtirishdan foydalanish tavsiya etiladi. Taklif etilgan yondashuv taqsimlangan hisoblash tarmog'ini zaiflik koeffitsiyentini (zarurat tug'ilganda esa umuman axborotlashtirish obyektlari uchun) hisoblashga mo'ljallangan analitik ifodani olish imkonini berdi.
- Taqsimlangan hisoblash tarmog'ini axborot xavfsizligi tizimini shakllantirish metodikasining ikkinchi bosqichida axborotlashtirish obyektlari tarmog'ini axborot xavfsizligi komponentlarini imitasion modellashtirish va virtualizatsiya usullari qo'llaniladi.
- Eksperimental tadqiqotlar jarayonida axborotlashtirish obyektlari ning himoyalangan tarmoq modeli yaratildi. Eksperimental modelda tarmoq qurilmalari va axborot xavfsizligi komponentlari virtual mashinalarda (VM) emulyatsiya qilindi. axborotlashtirish obyektlari tarmog'ini resurslari Proxmox VE server virtualizatsiya tizimi yordamida qayta tiklandi (replikatsiya qilindi). axborotlashtirish obyektlari tarmog'ini xostlarida PVE boshqaruvi ostida Suricata IPS tizimi joylashtirildi, Splunk tizimi esa SIEM sifatida qo'llanildi.
- Taqsimlangan hisoblash tarmog'ini uchun axborot xavfsizligi tizimini shakllantirishning taklif etilgan metodikasi va zaiflik koeffitsiyenti modeli taqsimlangan hisoblash tarmog'ining turli elementlari zaiflik darajalarini miqdoriy baholash imkonini berishi ko'rsatildi. Shuningdek, taklif etilgan model axborot xavfsizligi tarmoq tizimini loyihalash bosqichida axborotlashtirish obyektlari zaifligining kutilayotgan darajasini baholashni amalga oshirish, shuningdek tahdidlar va zaifliklarni neytrallashtirish bo'yicha qarshi choralar samaradorligini oldindan baholashga imkon berishi ta'kidlandi.

ADABIYOTLAR:

1. Evans, M., He, Y., Maglaras, L., & Janicke, H. HEART-IS: A novel technique for evaluating human error-related information security incidents. // *Computers & Security*. 2019. 80. P. 74-89. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.09.002>
2. Pérez-González, D., Preciado, S. T., & Solana-Gonzalez, P. Organizational practices as antecedents of the information security management performance: An empirical investigation. // *Information Technology & People*. 2019. 32(5). P. 1262-1275. <https://doi.org/10.1108/ITP-06-2018-0261>
3. Schlette, D., Caselli, M., & Pernul, G. A comparative study on cyber threat intelligence: the security incident response perspective. // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2021. 23(4). P. 2525-2556. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3117338>
4. Zegzhda, D. P., Lavrova, D. S., & Pavlenko, E. Y. Management of a dynamic infrastructure of complex systems under conditions of directed cyber attacks. // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2020. 59(3). P. 358-370. <http://dx.doi.org/10.1134/S1064230720020124>

5. Ahmetoglu, H., & Das, R. A comprehensive review on detection of cyber-attacks: Data sets, methods, challenges, and future research directions. // *Internet of Things*. 2022. 100615. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100615>
6. An, P., Wang, Z., & Zhang, C. Ensemble unsupervised autoencoders and Gaussian mixture model for cyberattack detection. // *Information Processing & Management*. 2022. 59(2). 102844. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2021.102844>
7. Aribisala, A., Khan, M. S., & Husari, G. (2021, October). *Machine Learning Algorithms and Their Applications in Classifying Cyber-Attacks On a Smart Grid Network*. In *2021 IEEE 12th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)* (pp. 0063-0069). IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/IEMCON53756.2021.9623067>
8. Angelini, M., Blasilli, G., Catarci, T., Lenti, S., & Santucci, G. *Vulnus: Visual vulnerability analysis for network security*. // *IEEE transactions on visualization and computer graphics*. 2018. 25(1). P. 183-192. <http://dx.doi.org/10.1109/TVCG.2018.2865028>
9. Yeboah-Ofori A, Islam S. *Cyber Security Threat Modeling for Supply Chain Organizational Environments*. // *Future Internet*. 2019. 11(3):63. <https://doi.org/10.3390/fi11030063>
10. Tanwar, R., Choudhury, T., Zamani, M., & Gupta, S. (Eds.). *Information Security and Optimization*. CRC Press. 2020.
11. Almohri, H. M., Watson, L. T., Yao, D., & Ou, X. *Security optimization of dynamic networks with probabilistic graph modeling and linear programming*. // *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. 2015. 13(4). P. 474-487. <http://dx.doi.org/10.1109/TDSC.2015.2411264>
12. Bouyeddou, B., Harrou, F., Kadri, B., & Sun, Y. *Detecting network cyber-attacks using an integrated statistical approach*. // *Cluster Computing*. 2021. 24(2). P. 1435-1453. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10586-020-03203-1>
13. Utzerath, J., & Dennis, R. *Numbers and statistics: data and cyber breaches under the General Data Protection Regulation*. // *International Cybersecurity Law Review*. 2021. 2(2). P. 339-348. <https://doi.org/10.1365/s43439-021-00041-8>
14. Schatz D., Bashroush R. *Economic valuation for information security investment: a systematic literature review*. // *Information Systems Frontiers*. 2017. T. 19. №5. P. 1205-1228. DOI <https://doi.org/10.1007/s10796-016-9648-8>
15. Оладько В.С. Модель выбора рационального состава средств защиты в системе электронной коммерции // *Вопросы кибербезопасности*. 2016. №1 (14). С.17-23. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-vybora-ratsionalnogo-sostava-sredstv-zaschity-v-sisteme-elektronnoy-kommertsii>
16. Прокушев Я.Е., Пономаренко С.В., Пономаренко С.А. Моделирование процессов проектирования систем защиты информации в государственных информационных системах // *Computational nanotechnology*. 2021. T. 8. № 1. С. 26–37. DOI: 10.33693/2313-223X-2021-8-1-26-37
17. Merchan-Lima, J., Astudillo-Salinas, F., Tello-Oquendo, L., Sanchez, F., Lopez-Fonseca, G., & Quiroz, D. *Information security management frameworks and institution: a systematic review*. // *Annals of Telecommunications*. 2021. 76(3). P. 255-270. <https://doi.org/10.1007/s12243-020-00783-2>

GTL KORXONALARI BUG' QOZONLARIDA BUG' TAYYORLASH JARAYONLARINI MUKAMMAL BOSHQARISH TIZIMLARINI ISHLAB CHIQUISH

Hamrayev Javlonbek Hoshim o'g'li,

Qarshi davlat texnika universiteti dotsenti, p.f.f.d (PhD)

hamrayevjavlonbek11@gmail.com

Farmonov Lazizbek Beg'am o'g'li,

Qarshi davlat texnika universiteti2-kurs magistratura talabasi

Annotatsiya. Mazkur maqolada GTL (Gas-to-Liquid) texnologiyasi asosida ishlovchi sanoat korxonalarida bug' qozonlarida bug' tayyorlash jarayonlarini samarali boshqarish masalalari yoritilgan. Tadqiqotda mavjud boshqaruv tizimlarining kamchiliklari tahlil qilinib, avtomatlashtirilgan nazorat va boshqaruv algoritmlarini takomillashtirish yo'llari taklif etilgan. Shuningdek, energiya tejamkorlikni oshirish, issiqlik yo'qotishlarini kamaytirish hamda bug' sifatini va barqarorligini ta'minlashga qaratilgan texnik yechimlar ishlab chiqilgan. Natijada ishlab chiqilgan tizim bug' ishlab chiqarish jarayonini real vaqt rejimida nazorat qilish, optimal harorat va bosim parametrlarini avtomatik ushlab turish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: GTL texnologiyasi, bug' qozoni, avtomatlashtirish, boshqaruv tizimi, energiya samaradorligi, issiqlik jarayoni, texnologik nazorat, raqamli tizim.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ СОВЕРШЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПАРПОДГОТОВКИ В ПАРОВЫХ КОТЛАХ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ GTL

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы эффективного управления процессами подготовки пара в паровых котлах на промышленных предприятиях, работающих по технологии GTL (Gas-to-Liquid). В исследовании проанализированы недостатки существующих систем управления, и предложены пути совершенствования алгоритмов автоматизированного контроля и управления. Также разработаны технические решения, направленные на повышение энергоэффективности, снижение потерь тепла и обеспечение качества и стабильности пара. В результате разработанная система позволяет контролировать процесс производства пара в режиме реального времени, автоматически поддерживать оптимальные параметры температуры и давления.

Ключевые слова: технология GTL, паровой котел, автоматизация, система управления, энергоэффективность, тепловой процесс, технологический контроль, цифровая система.

DEVELOPMENT OF A COMPREHENSIVE CONTROL SYSTEM FOR STEAM PRODUCTION PROCESSES IN STEAM BOILERS AT GTL ENTERPRISES

Abstract. This article covers issues of effective management of steam preparation processes in steam boilers at industrial enterprises operating on the basis of GTL (Gas-to-Liquid) technology. The study analyzes the shortcomings of existing control systems and proposes ways to improve automated control and management algorithms. Also, technical solutions aimed at increasing energy efficiency, reducing heat losses, and ensuring steam quality and stability have been developed. As a result, the developed system allows real-time control of the steam production process, automatic maintenance of optimal temperature and pressure parameters.

Keywords: GTL technology, steam boiler, automation, control system, energy efficiency, thermal process, technological control, digital system.

Kirish. Zamonaviy GTL (Gas-to-Liquid) korxonalarida gazni suyuqlikka aylantirish texnologiyasida asosiy issiqlik manbai sifatida bug' qozonlariga tayangan holda ishlaydi. Bug' ishlab chiqarish jarayoni GTL ishlab chiqarishning uzluksizligi, mahsulot sifatini va energiya tejamkorligi uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega. Shu sababli, bug' tayyorlash jarayonini mukammal boshqarish tizimini yaratish sanoatning barqaror ishlashini, xavfsizligini va iqtisodiy samaradorligini oshirishda muhim omil hisoblanadi.

GTL texnologiyalarining keng joriy etilishi natijasida energiya resurslaridan oqilona foydalanish, chiqindilarni kamaytirish va ekologik xavfsizlikni ta'minlash masalalari tobora dolzarb bo'lib bormoqda. Bug' qozonlarida boshqaruv jarayonlari yetarlicha optimallashtirilmagan taqdirda, issiqlik yo'qotishlari

ortadi, yoqilg'i sarfi ko'payadi va chiqindi gazlar hajmi oshadi. Bu esa ishlab chiqarish xarajatlarining ortishiga hamda ekologik muvozanatning buzilishiga olib keladi. Shuning uchun GTL korxonalarida bug' qozonlarini avtomatlashtirilgan tarzda boshqarish nafaqat texnik, balki iqtisodiy va ekologik jihatdan ham muhim ahamiyat kasb etadi. Mukammal boshqaruv tizimi yoqilg'i sarfini kamaytirish, bug' ishlab chiqarish sifatini barqarorlashtirish hamda chiqindi gazlarning zararli ta'sirini pasaytirish imkonini beradi.

Tadqiqot usullari. Tadqiqot obyekti sifatida GTL (Gas-to-Liquid) korxonasidagi bug' qozon qurilmasi va uning issiqlik-energetik jarayonlari tanlandi. Ushbu qozon qurilmasi tabiiy gazni yoqish orqali suvni bug' holatiga o'tkazish, bug' bosimi va haroratini muayyan texnologik parametrlar doirasida saqlash vazifasini bajaradi. Qozon tizimi quyidagi asosiy qismlardan iborat: yonish kamerasi, issiqlik almashinish sirtlari, suv ta'minoti nasoslari, bug' kollektorlari hamda avtomatik datchiklar tizimi. Jarayonning asosiy nazorat qilinadigan parametrlari — harorat, bosim, suv darajasi, bug' oqim tezligi va yoqilg'i sarfi hisoblanadi. Tadqiqot aynan shu parametrlarni optimallashtirish va ularni real vaqt rejimida avtomatik boshqarish imkonini beruvchi yangi tizimni ishlab chiqishga qaratilgan.

Yangi boshqaruv tizimini ishlab chiqish jarayoni to'rt bosqichli tizimli yondashuv asosida amalga oshirildi:

1. Tizimli tahlil bosqichi – mavjud bug' qozoni boshqaruv sxemalari, sensor tizimlari va operator paneli tahlil qilindi. Ularning ish rejimlari va xatolik manbalari aniqlanib, samaradorlik ko'rsatkichlari baholandi.

2. Modellashtirish bosqichi – qozon jarayonlari uchun issiqlik balanslari asosida matematik model tuzildi, bu model orqali harorat va bosim o'zgarishlari vaqt bo'yicha tahlil qilindi. 3. Algoritmik sintez bosqichi – mavjud nazorat tizimlari bilan taqqoslanadigan yangi boshqaruv algoritmi ishlab chiqildi; u adaptiv va optimallashtirilgan boshqaruv tamoyillariga asoslandi.

4. Eksperimental bosqich – taklif etilgan algoritm simulyatsion muhitda (MATLAB/Simulink asosida) sinovdan o'tkazilib, amaliy GTL sharoitlariga mosligi tekshirildi.

Ushbu bosqichlar integratsiyalashgan holda tizimning ishonchligi va barqarorligini ta'minlash uchun asos bo'ldi.

Bug' qozonidagi issiqlik jarayonlari energiyaning va massaning balansi tenglamalari asosida modellashtirildi.

Harorat va bosim o'zgarishlarini ifodalovchi asosiy dinamik munosabatlar quyidagicha yoziladi:

$$C_p \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out}$$

bu yerda:

- C_p — issiqlik sig'imi,
- T — qozon ichidagi harorat,
- Q_{in} — yonish natijasida hosil bo'lgan issiqlik miqdori,
- Q_{out} — bug' chiqishi va issiqlik yo'qotishlari.

Bug' bosimining o'zgarishi esa quyidagi differensial tenglama orqali ifodalanadi:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{R(T)}{V} (m_{in} - m_{out})$$

bu yerda:

- P — bug' bosimi,
- V — qozon hajmi,
- m_{in} va m_{out} — suv kiritilishi va bug' chiqarilishining massaviy tezliklari.

Ushbu tenglamalar MATLAB muhitida raqamli integratsiya usullari orqali yechilib, jarayon parametrlarining dinamik o'zgarishlari modellashtirildi. Natijalar tizim barqarorligini baholash va optimal boshqaruv strategiyasini ishlab chiqish uchun asos bo'ldi.

Taklif etilgan boshqaruv algoritmi adaptiv va neyron tarmoqli yondashuvlarga asoslanadi. Tizimda PID-regulyator asosiy boshqaruvchi sifatida qo'llanilgan, biroq u sun'iy neyron tarmoq orqali o'z parametrlarini real vaqt rejimida o'zgartira oladigan shaklda modernizatsiya qilingan.

1. Sensorlardan kelayotgan real o'lchov ma'lumotlari (harorat, bosim, bug' oqimi) neyron tarmoq blokiga uzatiladi.

2. Tarmoq o'tgan davr ma'lumotlariga asoslanib jarayonning keyingi holatini bashorat qiladi.

3. Boshqaruv bloki har bir o'zgaruvchiga mos optimal yoqilg'i sarfi, suv miqdori va havo oqimini hisoblaydi.

4. Natijada tizim real vaqt rejimida energiya yo'qotishlarini minimallashtiruvchi va bug' sifatini barqarorlashtiruvchi tarzda ishlaydi.

Algoritmning samaradorligi MATLAB/Simulink muhitida sinovdan o'tkazilgan bo'lib, natijalarda klassik PID tizimiga nisbatan javob tezligi 1,4 barobar, barqarorlashish vaqti esa 18% ga yaxshilangan. Tadqiqot jarayonida GTL (Gas-to-Liquid) korxonasiidagi bug' qozon qurilmasi uchun takomillashtirilgan avtomatik boshqaruv tizimi ishlab chiqildi. Yangi tizimning struktura sxemasi sensorlar orqali o'lgangan ma'lumotlarni qabul qiluvchi markaziy boshqaruv moduli, bug' bosimi va haroratini tartibga soluvchi aktuatorlar hamda monitoring va signalizatsiya tizimlaridan iborat. Ushbu tuzilma real vaqt rejimida bug' parametrlari ustidan doimiy nazoratni ta'minlaydi va inson omilidan kelib chiqadigan xatoliklarni kamaytiradi. Hisoblash va modellashtirish natijalari MATLAB/Simulink dasturiy muhitida amalga oshirildi. Modellashtirish jarayonida bug' qozonining issiqlik-energetik jarayonlari uchun dinamik model tuzildi va turli ish sharoitlarida sinovdan o'tkazildi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, taklif etilgan boshqaruv algoritmi bug' bosimini $\pm 1,5\%$ aniqlikda barqaror ushlab turadi. Tizimda yuzaga kelgan buzilish holatlarida (gaz bosimining o'zgarishi, issiqlik oqimining kechikishi va boshqalar) parametrlar 20–25 soniya ichida me'yorga qaytdi. Bu esa tizimning dinamik barqarorligi yuqori ekanini tasdiqlaydi. Eksperimental tadqiqotlar sanoat sharoitida o'tkazilib, nazariy modelning amaliy samaradorligi tekshirildi. Sinov natijalari quyidagicha bo'ldi: bug' ishlab chiqarish quvvati o'rtacha 8% ga oshdi, yonilg'i sarfi 6,5% ga kamaydi, harorat va bosim og'ishlari 2,3% dan oshmadi. Operator aralashuv chastotasi esa 40% ga kamayib, avtomatlashtirish darajasi ancha yuqoriligi qayd etildi.

Samaradorlik tahlili natijalari yangi boshqaruv tizimining afzalliklarini aniq ko'rsatdi. Energiya samaradorligi avvalgi tizimga nisbatan 4–6% ga yaxshilandi, bug' bosimi barqarorligi esa 1,8 barobar oshdi. Tizimning javob berish vaqti 15 soniyadan 9 soniyagacha qisqarib, tezkorlik va aniqlik darajasi sezilarli ravishda yaxshilandi. Bundan tashqari, xavfsizlikni oshirish maqsadida tizim ortiqcha bosim holatlarida avtomatik himoya mexanizmini ishga tushiradi. Olib borilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, ishlab chiqilgan boshqaruv tizimi GTL bug' qozon qurilmasining energiya samaradorligini oshiradi, ishlab chiqarish jarayonining barqarorligini ta'minlaydi hamda texnologik xavfsizlikni yuqori darajada kafolatlaydi. Bu natijalar amaliyotga joriy etilganda, korxonaning umumiy energiya sarfini kamaytirish va mahsuldorlikni oshirish imkonini beradi.

Natijalarning muhokamasi. Olingan natijalar GTL (Gas-to-Liquid) korxonasiidagi bug' qozon qurilmasi uchun ishlab chiqilgan yangi avtomatik boshqaruv tizimining samaradorligini ilmiy asosda tasdiqlaydi. Tizimning ishlash prinsipi issiqlik-energetik jarayonlarning dinamik modellariga asoslanib, PID (Proportional–Integral–Differential) boshqaruv qonuniyatlari va termodinamik muvozanat tenglamalari yordamida qurilgan. Natijalar shuni ko'rsatdiki, ishlab chiqilgan algoritm issiqlik oqimi va bosim parametrlarining o'zgarishiga tez javob berib, tizimning barqarorligini saqlab qoladi. Bu holat boshqaruv tizimlarida qo'llaniladigan klassik nazariya — “barqarorlik va adaptivlik muvozanati” tamoyiliga mos keladi.

Tadqiqot natijalarini avvalgi ishlanmalar bilan taqqoslash shuni ko'rsatdiki, ilgari qo'llanilgan an'anaviy mexanik boshqaruv tizimlarida bug' bosimi o'zgarishining o'rtacha og'ish darajasi 4–5% ni tashkil etgan. Yangi ishlab chiqilgan raqamli boshqaruv tizimi esa bu og'ishni 1,5% gacha kamaytirgan. Shuningdek, issiqlik energiyasidan foydalanish samaradorligi 4–6% ga oshgani boshqa tadqiqotchilar (masalan, issiqlik almashinuvi jarayonlarini modellashtirish bo'yicha olib borilgan xalqaro ishlar) natijalari bilan ham mos keladi. Bu o'xshashlik tizimning ilmiy asoslanganini va amaliy jihatdan ishonchli ekanini ko'rsatadi. Olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati shundaki, ishlab chiqilgan tizim GTL sanoatida energiya resurslaridan samarali foydalanish imkonini beradi. Natijada ishlab chiqarish jarayonida yoqilg'i sarfi kamayadi, karbonat angidrid chiqindilari pasayadi va ekologik yuklama qisqaradi. Tizimning yuqori avtomatlashtirish darajasi inson aralashuvini kamaytirib, operator xatoliklarining oldini oladi. Shu tariqa, ishlab chiqilgan boshqaruv algoritmi energetika sohasida raqamli transformatsiya jarayonlariga mos innovatsion yechim sifatida baholanishi mumkin.

Biroq tizimda ayrim cheklovlar ham mavjud. Jumladan, amaldagi model ayrim tashqi omillar — gaz bosimidagi keskin tebranishlar yoki kondensat tarkibining o'zgarishi kabi holatlarni to'liq hisobga olmaydi. Bundan tashqari, sensorlarning ishlash aniqligi tizimning umumiy javob sifatiga ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli, kelgusidagi tadqiqotlarda real vaqt rejimida o'zgaruvchan parametrlarni tahlil qiluvchi sun'iy intellekt asosidagi adaptiv boshqaruv modellarini joriy etish maqsadga muvofiqdir. Natijalar tahlili yangi

boshqaruv tizimining ilmiy asoslanganligini, amaliy jihatdan samarali ekanini va GTL sanoatida energiya tejamkorligini ta'minlashda katta ahamiyatga ega bo'lishini ko'rsatadi.

Xulosa. Ushbu tadqiqot natijalari GTL (Gas-to-Liquid) texnologiyasida qo'llaniladigan bug' qozon qurilmalarini boshqarish jarayonini takomillashtirish imkoniyatlarini ilmiy asosda ko'rsatdi. Ish davomida ishlab chiqilgan adaptiv boshqaruv algoritmi real vaqt rejimida bug' bosimi, harorati va energiya sarfini optimallashtirishga imkon berdi. Shuningdek, tizim issiqlik-energetik jarayonlarning o'zgarishiga tez javob berib, barqarorlik va ishonchlilik ko'rsatkichlarini yaxshilagan. Simulyatsiya natijalariga ko'ra, ishlab chiqilgan algoritmi an'anaviy PID boshqaruv tizimlariga nisbatan javob tezligini 1,4 barobar oshirgan, barqarorlashish vaqtini esa 18 foizga qisqartirgan. Natijada, tadqiqotda qo'yilgan asosiy maqsad — GTL sanoatidagi bug' qozonlarini boshqarishda energiya samaradorligi va avtomatlashtirish darajasini oshirish — to'liq amalga oshirildi.

ADABIYOTLAR:

1. Cengel, Y. A., Boles, M. A. *Muhandislik termodinamikasi asoslari*. — Toshkent: "Fan va texnologiya", 2018. — 624 b.
2. Jo'rayev, S. A., Matkarimov, A. X. *Issiqlik texnikasi va energetik qurilmalar asoslari*. — Toshkent: TDTU nashriyoti, 2020. — 312 b.
3. Nurmatov, B. M. *Avtomatik boshqaruv nazariyasi*. — Toshkent: "O'zbekiston milliy universiteti" nashriyoti, 2019. — 286 b.
4. Rashidov, O. Sh. *Texnologik jarayonlarni avtomatlashtirish asoslari*. — Toshkent: TDTU, 2021. — 340 b.
5. Karimov, S. B. "Bug' qozon qurilmalarida energiya samaradorligini oshirishning zamonaviy yondashuvlari." // *O'zbekiston muhandislik jurnali*, 2022, №2. — B. 47–52.
6. Xo'jayev, A. I. "GTL texnologiyalarida issiqlik-energetik jarayonlarni optimallashtirish." // *Texnika va texnologiyalar axborotnomasi*, 2023, №1. — B. 33–38.
7. Mirzayev, U. T., Yusupov, D. R. *Sanoat qozonlarining ishlash prinsiplari va energiya tejamkorligi*. — Toshkent: "Fan va innovatsiya", 2020. — 298 b.
8. Iskandarov, A. A. "MATLAB/Simulink muhitida qozon tizimlarini modellashtirish." // *Toshkent davlat texnika universiteti ilmiy axborotnomasi*, 2021, №4. — B. 65–72.
10. *O'zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi. GTL zavodlarida energiya samaradorligini oshirish bo'yicha texnik reglament*. — Toshkent, 2022. — 42 b.

2030

UZBEKISTAN RESEARCH ONLINE

uzjournals.edu.uz



® digital object
identifier

Google
scholar

ROAD

DIRECTORY
OF OPEN ACCESS
SCHOLARLY
RESOURCES



ADVANCED SCIENCES INDEX

**"SCIENTIFIC REPORTS
OF BUKHARA STATE
UNIVERSITY"**

The journal was composed
in the Editorial and
Publishing Department of
Bukhara State University.

Editorial address:

Bukhara, 200117
Bukhara State University, main
building, 2nd floor, room 219.
Editorial and Publishing
Department.
[https://buxdu.uz/32-buxoro-
davlat-universiteti-ilmiy-
axboroti/131/131-buxoro-davlat-
universiteti-ilmiy-axboroti/](https://buxdu.uz/32-buxoro-davlat-universiteti-ilmiy-axboroti/131/131-buxoro-davlat-universiteti-ilmiy-axboroti/)
e-mail:
nashriyot_buxdu@buxdu.uz

Printing was permitted
29.12.2025 y. Paper format
60x84,1/8. Printed in express
printing method. Conditional
printing plate – 35,30.
Circulation 70. Order № 30.
Price is negotiable.

Published in the printing house
"BUKHARAHAMD PRINT" LLC
Address: Bukhara, Hofiz tanish
Bukhari street, 190 B-house