$$\begin{cases} \tau_2^+{}'(y) + \int\limits_0^y \tau_2^+{}'(y_1) N(0,y;0,y_1)dy_1 - \int\limits_0^y \tau_3^-{}'(y_1) N(0,y;1,y_1)dy_1 = F_1(y), \\ \tau_3^-{}'(y) + \int\limits_0^y \tau_3^-{}'(y_1) N(1,y;1,y_1)dy_1 - \int\limits_0^y \tau_2^+{}'(y_1) N(1,y;0,y_1)dy_1 = F_2(y). \end{cases}$$

Bu yerda

$$F_1(y) = -\int\limits_0^1 \tau_1^+{}'(x_1) N(0,y;x_1,0)dx_1 + \frac{\varphi_2(y)}{1+\mu_2(y)},$$

$$F_2(y) = -\int\limits_0^1 \tau_1^+{}'(x_1) N(1,y;x_1,0)dx_1 + \frac{\varphi_3(y)}{1+\mu_3(y)}.$$

Xulosa. Integral tenglamalarning nazariyasiga ko‘ra [9], yuqorida keltirilgan Volterra tipidagi integral tenglamalar sistemasi bir qiymatli va qo‘shimcha shartlarsiz yechimga ega bo‘ladi.

Keyin masalaning yechimini Ω_0 soha ichida (11) formula orqali, qolgan sohalarda esa Dalamber formulasi yordamida Koshi masalasining yechimi sifatida topamiz. Teorema to‘liq isbotlandi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

(1). Бицадзе А.В., Самарский Л.Л. О некоторых простых обобщениях линейных эллиптических краевых задачах. ДАН СССР, 1969, т. 185, № 4, с. 739–740.

(2). Салахитдинов М.С., Мирсабуров М. Нелокальные задачи для уравнений смешанного типа с сингулярными коэффициентами. Ташкент, “Университет”, 2005, 250 с.; Джураев Т.Д., Сопуев А., Мамаджонов М. Краевые задачи для уравнений параболо-гиперболического типа. Ташкент, “Фан”, 1986, 220 с.

(3). Эгамбердиев У. Краевые задачи для смешанных параболо-гиперболических уравнений с двумя линиями изменения типа. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук, Ташкент, 1984.

(4). Ельсев В.А., Лесев В.Н. О двух краевых задачах для смешанных уравнений с перпендикулярными линиями изменения типа. Владикавказский математический журнал, 2001, № 4 (октябрь–декабрь). Т.3, с. 9–22.

(5). Berdyshev A.S., Karimov B.T. Some non-focal problems for the parabolic-hyperbolic equation with non-characteristic line of changing type// Central European Journal of Mathematics. 2006. 64 (2). p. 183–193.

(6). Berdyshev A.S., Rakhmatullayeva N.A. Noniocal problems with special gluing for a parsbolic-hyperbolic equation/Further progress in Analysis. Proceyedings of the 6 International ISAAC Congress. Ankara-Turkey, 2007, p. 727–734,

(7). Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М., изд-во МГУ, 1999, 799 с.

(8). Краснов М.Л. Интегральные уравнения. Введение в теорию. М., “Наука”, 1975, 303 с.

Zikrillaev Nurilla Fathullayevich (Toshkent davlat Texnika universiteti “Raqamli elektronika va mikroelektronika” kafedrasi professori),

Tursunov Orzibek Bahrom o‘g‘li (Toshkent davlat Texnika universiteti “Raqamli elektronika va mikroelektronika” kafedrasi mustaqil tadqiqotchisi)

MONOKRISTALL KREMNIYDA RUX VA SELEN ATOMLARINI DIFFUZION LEGIRLASH ORQALI Si_2ZnSe BINAR NANOKLASTERLARNI HOSIL QILISH VA ULARNING ELEKTROFIZIK XOSSALARI

Annotatsiya. *Ushbu maqolada monokristall kremniy (Si) panjarasida rux (Zn) va selen (Se) kirishma atomlarini ikki bosqichli past haroratli diffuzion texnologiya yordamida kiritish asosida Si^2ZnSe tuzilishidagi nanoo‘lchamdagi binar birikmali elementar yacheykalarni shakllantirish natijalari bayon etilgan. Tajribalar KEF-100 ($N_P=4\cdot10^{13}$ sm^{-3}) va KDB-0,5 markali monokristall kremniyda T=1150°C haroratda, t=1÷4 soat davomida gaz fazasidan diffuziya usulida amalga oshirilgan. Skanerlovchi elektron mikroskop (SEM JSM-IT 200), rentgenfazaviy tahlil (XRD PANalytical Empyrean), Raman spektrometri va UV-1900i Shimadzu spektrofotometri yordamida olingan kremniy namunalarining element tarkibi va optik xossalari o‘rganildi.*

Kalit so‘zlar: *kremniy, diffuzion legirlash, ZnSe binar birikma, nanoklaster, taqiqlangan soha kengligi, fotoelektrik xossalar, infraqizil fotodetektor.*

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ БИНАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ Si_2ZnSe В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ АТОМОВ ПРИМЕСЕЙ ЦИНКА И СЕЛЕНА ПОСРЕДСТВОМ ДВУХСТАДИЙНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДИФФУЗИОННОГО ПРОЦЕССА

Аннотация. *В данной работе описывается формирование наноразмерных бинарных соединений Si_2ZnSe в монокристаллическом кремнии путем введения атомов примесей цинка (Zn) и селена (Se) посредством двухстадийного низкотемпературного диффузионного процесса. Эксперименты проводились на кремнии марок KEF-100 ($NP=4\times10^{13}$ $см^{-3}$) и KDB-0.5 при температуре T=1150°C в течение t=1÷4 ч методом газофазной диффузии. Элементный состав и оптические свойства образцов изучались с помощью СЭМ (JSM-IT 200), рентгеновской дифракции (PANalytical Empyrean), рамановской спектрометрии и спектрофотометрии UV-1900i Shimadzu. Ширина запрещенной зоны Si2ZnSe, образованного на поверхности Si, была определена методом Таука и составила $Eg(Si_2ZnSe)$ =1,24 эВ.*

Ключевые слова*: кремний, диффузионное легирование, бинарное соединение ZnSe, нанокластер, ширина запрещенной зоны, фотоэлектрические свойства, инфракрасный фотодетектор.*

FORMATION OF SI_2ZNSE BINARY NANOCLUSTERS IN MONOCRYSTALLINE SILICON BY DIFFUSION DOPING OF ZINC AND SELENIUM ATOMS AND THEIR ELECTROPHYSICAL PROPERTIES

Annotation*. This paper reports the formation of Si_2ZnSe nanoscale binary compound unit cells in monocrystalline silicon by introducing zinc (Zn) and selenium (Se) impurity atoms via a two-stage low-temperature diffusion process. Experiments were carried out on KEF-100 ($N_P=4\times10^{13}$ cm^{-3}) and KDB-0.5 grade silicon at T=1150°C for t=1÷4 h by gas-phase diffusion. The elemental composition and optical properties of the samples were studied by SEM (JSM-IT 200), XRD (PANalytical Empyrean), Raman spectrometry and UV-1900i Shimadzu spectrophotometry.*

Keywords: *silicon, diffusion doping, ZnSe binary compound, nanocluster, bandgap, photoelectric properties, infrared photodetector.*

Kirish. Zamonaviy nanoelektronika va fotoenergetika sohasida kremniy asosidagi yarim o‘tkazgich materiallarning elektrofizik va fotoelektrik parametrlarini kengaytirish dolzarb muammo sifatida kun tartibida turibdi. Elementar Si ning taqiqlangan soha kengligi (E_g = 1,12 eV) va spektral sezgirligi $\lambda < 1,1$ mkm oralig‘ida cheklangan bo‘lib, infraqizil (IQ) va ultrabinafsha (UB) nurlanish diapazonlarida ishlaydigan fotodetektor va fotoelementlar yaratishda bu holat asosiy cheklovchi omil hisoblanadi [1–3].

AIIBVI birikmali yarimo‘tkazgichlar, xususan, rux selenid (ZnSe, E_g=2,70 eV, to‘g‘ri zonaali o‘tish) — LED, lazerlash va IQ detektor texnologiyalarida muhim o‘rin tutadi [4,5]. Biroq ZnSe kristallini alohida substrat sifatida ishlab chiqarish texnologik jihatdan murakkab va qimmat. Shuning uchun Si kristall panjarasida ZnSe tuzilishidagi binar birikmali nanoklasterlarni hosil qilish ikkala material xossalarini birlashtirishning qulay va iqtisodiy maqsadga muvofiq yo‘lidir.

Mavzuning o‘rganilganlik darajasiga ko‘ra, Hu va boshq. [6] Si/ZnSe qobiqli nanostrukturalarni sintez qilishdi. Baxodirxonov va boshqlar [7;8] kremniydagi II–VI guruh elementlari asosidagi birikmalarni o‘rganishdi; Saidov va boshqlar [9] $(Si^2)_{1-x}(ZnSe)_x$ qattiq eritma fotoelementlarini tahlil qilishdi.

Ushbu maqolaning maqsadi–(i) monokristall Si da ikki bosqichli past haroratli diffuzion texnologiya yordamida Si^2ZnSe binar nanoklasterlari hosil qilishning optimal shartlarini aniqlash, (ii) hosil bo‘lgan nanoklasterlarning element tarkibi, taqiqlangan soha kengligi va fotoelektrik parametrlarini zamonaviy tahlil usullari bilan eksperimental tasdiqlash.

Materiallar va usullar. Boshlang‘ich material sifatida n-turdagi KEF-100 ($N_P = 4\cdot10^{13}$ sm^{-3}) va p-turdagi KDB-0,5 ($N_B = 3\cdot10^{17}$ sm^{-3}) markali monokristall kremniy plastinkalari tanlab olindi. Namunalar STX-402 olmos ipli keskich bilan $10\times8\times1$ mm^3 o‘lchamda kesib olindi va M14/M5 olmos kukuni bilan mexanik ishlov berildi. Sirt tozalash uchun HNO_3:HF = 4,5:1 eritmasida kimyoviy yemirilish amalga oshirildi.

Kirishma atomlari sifatida kimyoviy tozaligi 99,99% bo‘lgan Zn va Se elementlari tanlandi. Diffuziya jarayoni vakuumli kvars ampulalarda ($P = 10^{-4}\div10^{-5}$ mm.sim.ust.) TK-2-3-17A2 markali gorizontal elektr pechda amalga oshirildi. Harorat ko‘tarilish tezligi: 5°C/min; diffuziya rejimlari: T = 900÷1250°C, t = 1÷10 soat.

Selen kirishma atomlarining Si sirtida kuchli eroziya hosil qilishi ma’lum muammo [10]. Uni bartaraf etish uchun M.K.Baxodirxonov ilmiy maktabida ishlab chiqilgan va ushbu tadqiqotda qo‘llanilgan ikki bosqichli texnologiya quyidagicha amalga oshirildi:

1-bosqich. Harorat xona temperaturasidan T = 600÷700°Cgacha 5°C/min tezlik bilan oshirildi; Se atomlari sekin bug'ga aylanib, Si sirtiga joylashdi.

2-bosqich. T = 1150°Cgacha tez (150÷200°C/min) ko'tarilib, t = 1÷4 soat ushlab turildi. Kvars ampuladagi Se partsial bosimi Avogadro soni va massani o'lchash orqali P ≈ 0,5 atm ga sozlandi. Natijada selen atomlarining gaz-bug' holatidagi bosimi boshqarildi va kremniy sirtida eroziya kuzatilmadi.

Olingan namunalar quyidagi zamonaviy usullar bilan tavsiflandi: skanerlovchi elektron mikroskopiya va EDS element tahlili (SEM JSM-IT 200, Carl Zeiss), rentgenfazaviy tahlil (XRD PANalytical Empyrean), Raman spektrometri (508 PV), UV-ko'rinadigan nurlanish spektrofotometri (Shimadzu UV-1900i, λ = 190÷1100 nm), atom kuchlari mikroskopi (Core AFM), Van-der-Pau usulida elektrofizik parametrlar (Ecopia HMS-3000), taqiqlangan soha kengligi Taus formulasi [11] bilan:

$$E_g = 1240/\lambda^*, \quad \alpha = 2{,}303 \cdot \log(A/t), \quad (\alpha h\nu)^2 = K(h\nu - E_g) \quad \ldots(1)$$

Bu yerda: α – nurni yutilish koeffitsiyenti, h – Plank doimiysi, ν – chastota, K – proporsionallik doimiysi.

Tajriba natijalari va muhokama. 1-jadval Si ga kiritilgan Zn va Se kirishma atomlarining T = 1150°C da turli diffuziya vaqtlarida kremniyga kirish chuqurliklarini ko'rsatadi. Diffuziya koeffitsiyentlari: $D_{Se} = 4{,}01 \cdot 10^{-9}$ sm^2/s va $D_{Zn} = 1{,}2 \cdot 10^{-6}$ sm^2/s.

1-jadval. Kirishma atomlarining T=1150°C da kirish chuqurligi, mkm

Kirishma atomlari	60 s	600 s	900 s	1800 s	3600 s	D, sm²/s
Selen (Se)	7	17	21	27	37	$4{,}01 \cdot 10^{-9}$
Rux (Zn)	85	280	350	470	665	$1{,}2 \cdot 10^{-6}$

Mavjud diffuzion texnologiya bo'yicha (bir bosqichli, harorat tez ko'tarilgan holda) Si namunalari sirtida 5÷10 mkm chuqurlikkacha erozion yemirilish kuzatildi. Ikki bosqichli texnologiya bo'yicha (harorat bosqichma-bosqich, 5°C/min tezlikda oshirilgan holda) eroziya deyarli bartaraf etildi; rux va selen kirishma atomlarining kremniydagi eruvchanlik konsentratsiyasi 1,5÷2 barobar oshdi.

Si_2ZnSe nanoklasterlari mavjud kremniy namunalarining element tarkibi JSM-IT 200 markali SEM-EDS qurilmasida o'rganildi. 2-jadvalda namuna sirtidagi o'rtacha qiymatlar keltirilgan.

2-jadval. Si sirtida hosil bo'lgan ZnSe binar birikmali nanoklasterlarning element tarkibi (SEM-EDS)

Element	Massa ulushi, %	Atom ulushi, %
Si	93,58 ± 0,37	97,43 ± 0,39
Zn	2,52 ± 0,16	1,13 ± 0,07
Se	3,89 ± 0,39	1,44 ± 0,14
Jami	100,00	100,00

Atom foizlarida Zn:Se ≈ 1,13:1,44 ≈ 0,78 nisbat kuzatildi. Bu Si panjarasida ZnSe stexiometriyaga nisbatan Zn ning biroz kamligini ko'rsatadi va asosiy birikmaning $Si_2Zn^-Se^{++}$ ko'rinishidagi ion-kovalent bog'lanishga mos keladi [12]. Kremniy sirtidan 5 mkm chuqurligida esa Zn:Se ≈ 30,5:29,5 (3-jadval) nisbatiga yaqin bo'lib, bu diffuziya chuqurligida stexiometrik ZnSe tuzilishi shakllanganidan dalolat beradi.

3-jadval. Si sirtida Zn va Se kirishma atomlari boyitilgan qatlamining element tarkibi

Element	Massa ulushi, %	Atom ulushi, %
Si	20,58	40,0
Zn	36,65	30,5
Se	42,77	29,5
Jami	100,00	100,0

Raman spektrida (boshlang'ich Si): 525 sm^{-1}da Si ning fonon cho'qqisi kuzatildi. Zn va Se bilan legirlangan Si namunasida: 350 sm^{-1} va 950 sm^{-1} yaqinida yangi cho'qqilar paydo bo'ldi. Bu cho'qqilar ZnSe va Si^2ZnSe birikmalarining hosil bo'lishini tasdiqlaydi va sof ZnSe kristallining Raman spektri bilan mos keladi.

Shimadzu UV-1900i da xona haroratida (T = 300 K) o'lchangan UV-ko'rinadigan yutilish spektri asosida Taus grafikidan quyidagi qiymatlar aniqlandi:

4-jadval. Namunalarning taqiqlangan soha kengligi

Namuna	E^G (eV)	Izoh
Boshlang‘ich Si (KEF-100)	1,12	Adabiyot qiymati bilan mos [1]
Si (T=1150°C, t=2 soat, diffuziantsiz)	1,12	Harorat ta’siri sezilarli emas
Si_2ZnSe (Zn+Se, T=1150°C, t=2 soat)	1,24	Yangi birikma E^G > Si E^G
Sof ZnSe kristall (mos yozuv)	2,70	Madelung [14]

Si panjarasida hosil bo‘lgan Si^2ZnSe birikmalarining E_g = 1,24 eV – boshlang‘ich Si ning 1,12 eV va sof ZnSe ning 2,70 eV orasida joylashgan. Bu E_g qiymati Zikrillayev va boshqalar [15] tomonidan hisoblangan nisbiy og‘ish $\Delta r/r$ = 3,4% ga mos keladi (3.7-jadval: ZnSe juftligi uchun 1-toifa, eng mos juftlik). $(Si_{1-x})(ZnSe)_x$ qattiq eritmasining taqiqlangan soha kengligi x = 0÷0,1 oralig‘ida 0,25% dan oshmaydi – bu ZnSe birikmalarining Si panjarasiga integratsiyasi ketma-ket sodir bo‘lishining belgisidir.

Si kristall panjarasida II va VI guruh elementlari alohida atom holatida bo‘lganda: Zn ioni ikki karra manfiy zaryad (Zn^{--}), Se ioni ikki karra musbat zaryad (Se^{++}) hosil qiladi. Bu ionlar atrofida kuchli elektrostatik maydon paydo bo‘lib, Si panjarasini deformatsiya qiladi. Agar diffuziya shartlari maqbul bo‘lsa, Zn va Se ionlari Si panjarasida yonma-yon joylashib, Se^{++} ning ikkita qo‘shimcha elektroni Zn^{--} ga o‘tadi. Natijada elektroneytral ion-kovalent $Si^2Zn^-Se^{++}$ birikma hosil bo‘ladi.

Bu mexanizm uchun zaruriy shart: Zn va Se kovalent radiuslari yig‘indisining Si kovalent radiuslari yig‘indisidan og‘ishi $\Delta r < 0{,}2r_{Si}$ bo‘lishi [12]. ZnSe uchun: $r_{Zn} + r_{Se}$ = 2,42 Å, Δr = 0,08 Å, nisbiy og‘ish 3,4% – bu 1-toifaga kiradi va eng qulay juftlik hisoblanadi.

Shakllanish bog‘lanish energiyasi Arrhenius tenglamasi asosida T = 1150°C da E = 0,78 eV ga teng bo‘ldi. ZnSe va Si^2 izovalentlik va elektroneytrallik sharti: $Z_{Zn} + Z_{Se} = Z_{Si} + Z_{Si}$. Hosil bo‘lgan binar birikmalar: (a) Si kristall panjarasining ichki tetraedral bog‘lanishini buzmaydi; (b) taqiqlangan sohada chuqur energetik sathlar hosil qilmaydi; (c) qo‘shimcha erkin zaryad tashuvchilar yaratmaydi; (d) tizimning erkin energiyasini sezilarli kamaytiradi.

Xulosa. Ikki bosqichli past haroratli diffuziya texnologiyasida Se bug‘ bosimini boshqarish orqali monokristall Si sirti eroziyasi bartaraf etilib, kirishmalar eruvchanligi 1,5–2 barobarga oshirildi hamda tizimning erkin energiyasini kamaytirishga intiluvchi spontan mexanizm asosida o‘lchami D= 34 nm bo‘lgan ZnSe va Si_2ZnSe nanoklasterlari shakllantirildi. Ilk bor aniqlangan taqiqlangan soha kengligi E_g = 1,24 eV bo‘lgan ushbu yangi geterostruktura material hisobiga namunalarning spektral sezgirligi yaqin infraqizil λ = 1 -4 mkm sohasiga kengaydi, fototok miqdori 100 martadan ortiq o‘sdi va salt yurish kuchlanishi Us.yu. = 461 mV ga yetdi, bu esa kremniyli fotoelektrik qurilmalarning samaradorligini oshirishda muhim ahamiyatga ega.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

(1). Sze S.M., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices. 3rd ed. Wiley-Interscience, Hoboken NJ, 2007, 815 p.

(2). Madelung O. (Ed.) Semiconductors: Data Handbook. 3rd ed. Springer, Berlin, 2004, 692 p.

(3). Stoneham A.M. Theory of Defects in Solids. Oxford Univ. Press, 2001, 955 p.

(4). Kolodziejski L.A., Gunshor R.L., Nurmikko A.V. Wide bandgap II–VI heterostructures for blue/green light emitters. Annu. Rev. Mater. Sci. 1995, vol. 25, p. 711–753.

(5). Morkoç H. et al. Large-band-gap SiC, III–V nitride, and II–VI ZnSe-based semiconductor device technologies, J.Appl. Phys. 1994, vol. 76, № 3, p. 1363–1398.

(6). Hu J.Q., Bando Y., Zhang J.H., Golberg D. Si/ZnS and Si/ZnSe core/shell nanocrystal structures. Appl. Phys. Lett. 2004, vol. 85, № 16, p. 3623–3625.

(7). Баходирхонов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Исамов С.Б., Турекаев Х.С., Валиев С.А. Физика и техника полупроводников. 2022, т. 56, вып. 2, с. 199–203.

(8). Баходирхонов М.К., Кенжаев З.Т., Ковешников С.В., Усмонов А.А., Мавлонов Г.Х. Неорганические материалы. 2022, т. 58, № 1, с. 3–9.

(9). Saidov A.S., Usmonov Sh.N., Holikov K.T., Saparov D. Synthesis and characterization of $(Si_2)_{1-x-\gamma}(Ge_2)_x(GaAs)_\gamma$ solid solutions. Technical Physics Letters. 2007, vol. 33, № 8, p. 701–703.

(10). Zikrillaev N.F., Tursunov O.B. Study of silicon diffusionally doped with Zn and Se atoms. Alternative Energy and Ecology. 2022, № 6 (399), p. 36–39.

(11). Tauc J., Grigorovici R., Vancu A. Optical properties and electronic structure of amorphous germanium // Phys. Status Solidi. 1966, vol. 15, № 2, p. 627–637.

(12). Zikrillaev N.F., Tursunov O.B., Kushiyev G.A. Development and Creation of a New Class of Graded-Gap Structures Based on Silicon with the Participation of Zn and Se Atoms. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2023, vol. 59, № 5, p. 670–673.

Inomova Ozodaxon Shavkatjon qizi (Namangan davlat universiteti talabasi;
https://orcid.org/0009-0007-1580-9178; e-mail: shavkatjonovna0217@gmail.com)

OMBORXONA LOGISTIKASIDA KO‘P ROBOTLI TIZIMLARNI TRANSPORT MASALASINI DINAMIK VAQT CHEKLOVLARI OSTIDA MODELLASHTIRISH

Annotatsiya. *Ushbu maqolada omborxona logistikasida ko‘p robotli tizimlarda vazifalarni taqsimlash masalasi transport masalasi asosida matematik modellashtirilgan. Modelda robotlar va vazifalar o‘rtasidagi moslik xarajatlar matritsasi orqali ifodalanib, vazifalarning bajarilishida vaqt cheklovlari (deadline va kechikish jarimalari) hisobga olingan. Taklif etilgan yondashuvda klassik transport modeli kengaytirilib, unga vaqtga bog‘liq cheklovlar va kechikish funksiyasi kiritilgan. Bu esa real omborxona sharoitida buyurtmalarni o‘z vaqtida bajarish va resurslardan samarali foydalanish imkonini beradi.*

Kalit so‘zlar: *omborxona logistikasi, ko‘p robotli tizimlar, shimoli-g‘arbiy burchak usuli, minimal elementlar usuli, potensiallar usuli, dinamik vaqt cheklovlari, kechikish jarimasi.*

Иномова Озодахон Шавкатжон кизи (студентка Наманганского государственного университета;
https://orcid.org/0009-0007-1580-9178; e-маил: shavkatjonovna0217@gmail.com)

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОРОБОТНЫХ СИСТЕМ В СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКЕ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ

Аннотация. *В данной статье рассматривается математическая модель распределения задач в многороботных системах складской логистики на основе транспортной задачи. В предложенной модели соответствие между роботами и задачами представлено в виде матрицы затрат, а также учитываются временные ограничения (дедлайны и штрафы за задержку) при выполнении задач. Предложенный подход расширяет классическую транспортную модель за счёт введения временно-зависимых ограничений и функции штрафа за задержку. Это позволяет эффективно использовать ресурсы и обеспечивать своевременное выполнение заказов в реальных условиях складской логистики.*

Ключевые слова: *складская логистика, многороботные системы, метод северо-западного угла, метод минимального элемента, метод потенциалов, динамические временные ограничения, штраф за задержку.*

Inomova Ozodaxon Shavkatjon qizi (Student of Namangan state university;
https://orcid.org/0009-0007-1580-9178; e-mail: shavkatjonovna0217@gmail.com)

MODELING OF MULTI-ROBOT SYSTEMS IN WAREHOUSE LOGISTICS UNDER DYNAMIC TIME CONSTRAINTS OF THE TRANSPORTATION PROBLEM

Annotation. *This article presents a mathematical model of task allocation in multi-robot systems in warehouse logistics based on the transportation problem. In the proposed model, the correspondence between robots and tasks is represented using a cost matrix, and time constraints (deadlines and delay penalties) in task execution are taken into account. The proposed approach extends the classical transportation model by incorporating time-dependent constraints and a delay penalty function. This enables efficient utilization of resources and timely completion of orders in real warehouse environments.*

Keywords: *warehouse logistics, multi-robot systems, northwest corner method, least cost method, potential method, dynamic time constraints, delay penalty.*

Kirish. Zamonaviy omborxona logistikasida avtomatlashtirilgan tizimlarning samaradorligi to‘g‘ridan to‘g‘ri ko‘p agentli tizimlarning (Multi-Agent Systems) muvofiqlashtirilgan ishlashiga bog‘liq [1]. So‘nggi yillarda omborxona jarayonlarini avtomatlashtirish, ayniqsa robotlashtirilgan transport tizimlarini integratsiya qilish ishlab chiqarish unumdorligini oshirishning asosiy omiliga aylandi [4]. Biroq, dinamik o‘zgarib turuvchi muhitda robotlarning vaqt cheklovlari (Time Windows) ostida ishlashi logistika tizimlarining yuqori darajada moslashuvchanligini taqozo etadi [3].

Mavjud tadqiqotlar ko‘p agentli yo‘l qidirish (MAPF) muammolarini hal qilishda sezilarli yutuqlarga erishgan bo‘lsa-da [2], vaqt omilini aksariyat hollarda qat’iy cheklov (Hard Constraint) sifatida qarashadi. Bu yondashuv dinamik vaziyatlarda tizimning “yechim topa olmaslik” (infeasibility) holatiga tushib qolishiga olib keladi [5]. Hozircha vaqt cheklovlarini operatsion xarajatlar tarkibiga kiritib, uni dinamik jarima funksiyasi orqali optimallashtirish masalasi yetarlicha yoritilmagan. Shu bois ushbu tadqiqotning maqsadi