

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA  
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
PhD.03/2025.27.12.T.02.07 RAQAMLI ILMIY KENGASH  
ASOSIDAGI BIR MARTALIK ILMIY KENGASH**

---

**NAVOIY DAVLAT UNIVERSITETI**

**NOROV G'ULOMJON MIRZOG'OLIB O'G'LI**

**KARYERDA ISHLASH JARAYONLARINI MATEMATIK  
MODELLASHTIRISH: ASOSIY PARAMETRLARNI TAHLIL QILISH,  
OPTIMALLASHTIRISH VA PROGNOZLASH**

**04.00.17 – Konchilikda fizik jarayonlar;  
05.01.07 – Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui**

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi  
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)  
по техническим наукам**

**Content of dissertation abstract of Doctor of Philosophy (PhD)  
of technical sciences**

**Norov G‘ulomjon Mirzog‘olib o‘g‘li**

Карьерда ишлаш жарайонларини математик моделлаштириш: асосий  
parametrlarni tahlil qilish, optimallashtirish va prognozlash .....3

**Норов Гуломжон Мирзоголиб угли**

Математическое моделирование процессов эксплуатации карьера:  
анализ, оптимизация и прогнозирование основных параметров .....23

**Norov Gulomjon Mirzogolib ugli**

Mathematical modeling of open-pit operation processes:  
analysis, optimization, and prediction of key parameters .....43

**E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati**

Список опубликованных работ

List of published works.....47

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA  
UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
PhD.03/2025.27.12.T.02.07 RAQAMLI ILMIY KENGASH  
ASOSIDAGI BIR MARTALIK ILMIY KENGASH**

---

**NAVOIY DAVLAT UNIVERSITETI**

**NOROV G'ULOMJON MIRZOG'OLIB O'G'LI**

**KARYERDA ISHLASH JARAYONLARINI MATEMATIK  
MODELLASHTIRISH: ASOSIY PARAMETRLARNI TAHLIL QILISH,  
OPTIMALLASHTIRISH VA PROGNOZLASH**

**04.00.17 – Konchilikda fizik jarayonlar;  
05.01.07 – Matematik modellashtirish. Sonli usullar va dasturlar majmui**

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.4.PhD/T5059 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya Navoiy davlat universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezюме) Ilmiy kengashning veb-sahifasida ([www.tdtu.uz](http://www.tdtu.uz)) va «ZiyoNeb» Axborot ta'lim portalida ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbarlar:** **Nasirov Utkir Fatidinovich**  
texnika fanlari doktori, professor  
**Xudayberdiyev Oybek Jumaboyevich**  
fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

**Rasmiy opponentlar:** **Kazakov Aziz Nigmanovich**  
texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent  
**Baxromov Sayfiddin Akbarovich**  
texnika fanlari doktori (DSc), dotsent

**Yetakchi tashkilot:** **Geologiya fanlari universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Toshkent davlat texnika universiteti huzuridagi PhD.03/2025.27.12.T.02.07 raqamli Ilmiy kengashning 2026-yil «24» 04 soat 14<sup>30</sup> dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi, 2-uy. tel./faks: (99871) 207-44-40/207-14-64, e-mail: [tadqiqotchi@tdtu.uz](mailto:tadqiqotchi@tdtu.uz)).

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat texnika universiteti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (97 -raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko'chasi, 2-uy. Tel.: (99871) 207-44-40).

Dissertatsiya avtoreferati 2026-yil «09» 04 kuni tarqatildi.  
(2026-yil «09» 04 dagi \_\_\_ - raqamli reyestr bayonnomasi).



**J.B. Toshov**  
beruvchi bir martalik Ilmiy kengash raisi,  
texnika fanlari doktori, professor

**T.O. Komilov**  
Ilmiy darajalar beruvchi bir martalik  
Ilmiy kengash kotibi, PhD, dotsent

**S.S. Sayyidqosimov**  
Ilmiy darajalar beruvchi bir martalik Ilmiy  
kengash qoshidagi Ilmiy seminar raisi  
texnika fanlari doktori, professor

## KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Bugungi kunda jahon konchilik sanoati rivojlanishining zamonaviy bosqichida foydali qazilma konlarining tobora chuqurroq qatlamlarini o‘zlashtirishni taqozo etmoqda. Bu o‘z navbatida ochiq kon ishlarini olib borishning geomexanik sharoitlarini sezilarli darajada murakkablashtiradi, karyer bortlarining o‘lchamlarini oshiradi, shuningdek, tog‘ jinslari massivining kuchlanganlik-deformatsiyalanganlik holatini murakkablashtiradi. Chuqur karyerlarni loyihalash va bort qiyaliklarning ustuvorligini pasayish xavfining ortib borishi asosiy cheklovchi omilga aylanib bormoqda. Geologik va texnologik omillarning yuqori darajadagi noaniqlik sharoitida bort qiyaliklarning ustuvorligini baholash va qazib olish parametrlarini optimallashtirish uchun matematik modellashtirish va sonli usullarni qo‘llashning ahamiyati ortib bormoqda. Ushbu yo‘nalishning istiqbolli sohalardan biri karyer bortining qavariq shaklini analitik va sonli usullar, shu jumladan, tabiiy va texnogen omillarni hisobga olgan holda pog‘onalar trayektoriyalarini yanada moslashuvchan va aniq tasvirlash imkonini beruvchi uchinchi darajali lokal interpolatsion splayn  $S_3(x)$  modellar ko‘p qo‘llaniladi. Chunki faqat uchinchi darajali lokal interpolatsion splayn  $S_3(x)$  modellarida nazariy asoslangan ekstremal xossasi mavjud bo‘lganligi uchun amaliy masalalarni modellashtirish jarayonlarida yaqinlashish tezligi yuqoriligi bilan katta ahamiyatga ega. Shuning uchun ham fan va texnikani rivojlanishida, ayniqsa, konchilik sohasida rivojlantirishda uchinchi darajali lokal interpolatsion splayn  $S_3(x)$  modellarni qo‘llanilishi amaliy nuqtai nazardan dolzarb masalalardan hisoblanadi.

Dunyoda chuqur karyerlar qiyaliklari va bortlarining ustuvorligini ta‘minlash usullarini ishlab chiqish va takomillashtirish bo‘yicha ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu borada, katta chuqurliklarda konlarni qazib olishda kon-geologik va texnogen omillar murakkablashayotgan sharoitda ustuvorlikni aniq prognozlash, qiyaliklar geometriyasini optimallashtirish va texnogen qulashlar xavfini minimallashtirish, ustuvorlikni aniq prognoz qilish, massiv geometriyasini, tog‘ jinslarining fizik-mexanik xossalarini va tashqi ta‘sirlarni hisobga olish imkonini beruvchi samarali matematik modellarni ishlab chiqish va karyer bortlari parametrlarini ratsional loyihalashga alohida e‘tibor berilmoqda.

Respublikamizda ochiq usulda qazib olinadigan konlarning o‘ziga xos geologik-texnik sharoitlari uchun matematik modellashtirish usullaridan foydalanish karyerlar qiyaliklari va bortlarining ustuvorligini baholash bo‘yicha bir qator ilmiy-amaliy ishlar bajarilgan. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining Farmoni<sup>1</sup> konchilik sanoatiga innovatsion texnologiyalar va ilmiy ishlanmalarni joriy etish, yer ostini geologik o‘rganish, undan foydalanish va muhofaza qilish sohasida yagona davlat siyosatini amalga oshirish, shuningdek, joylarda yangi sanoat quvvatlarini yaratishni hisobga olgan holda geologiya-qidiruv ishlarining samaradorligini oshirish va iqtisodiyot tarmoqlarining mineral-xomashyo bazasini

---

<sup>1</sup> O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 27-iyuldagi “Ma‘muriy islohotlar doirasida tog‘-kon sanoati va geologiya sohasida davlat boshqaruvini samarali tashkil etish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi PF-116-son Farmoni.

qayta tiklash bo'yicha muhim vazifalar belgilangan. Shu munosabat bilan karyer bortlari parametrlarini oqilona tanlash uchun massiv geometriyasini, tog' jinslarining fizik-mexanik xususiyatlarini va tashqi yuklar ta'sirini hisobga olish imkonini beradigan uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellar va sonli usullarni joriy etish muhim ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son "2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida", 2015-yil 4-martdagi PF-4707-son "2015–2019-yillarda ishlab chiqarishni tarkibiy o'zgartirish, modernizatsiya va diversifikatsiya qilishni ta'minlash bo'yicha chora-tadbirlar dasturi to'g'risida"gi farmonlari va 2019-yil 17-yanvardagi PQ-4124-son "Kon-metallurgiya tarmog'i korxonalari faoliyatini yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi qarori hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning Respublika fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot Respublikamizning fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo'nalishi bo'lgan VII. "Yer haqidagi fanlar (geologiya, geofizika, seysmologiya va mineral xomashyoni qayta ishlash)" yo'nalishiga muvofiq amalga oshirilgan.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Karyerlar bortlarining ustuvorligini ta'minlash nazariyasi va amaliyotining sezilarli rivojlanishiga matematik modellashtirish, sonli usullar va geomexanik tahlil usullarini qo'llash orqali erishilgan. Biroq, mavjud yondashuvlar murakkablashgan geologik-texnik sharoitlar va konlarni qazib olish chuqurligining oshishini hisobga olgan holda yanada moslashish va takomillashtirishni talab qiladi, bu esa bort qiyaliklar shaklini optimallashtirish va konchilik ishlari xavfsizligini oshirishning yangi usullarini ishlab chiqishni taqozo etadi.

Hozirgi kunda e'lon qilingan ilmiy adabiyotlarda bort qiyaliklarning ustuvorligini baholashning turli usullari, jumladan, klassik analitik yondashuvlar, chekli elementli modellashtirish, prognozli tahlil usullari, ayniqsa, amaliy nuqtai nazardan yuqori natijalarga erishayotgan uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellar va zamonaviy raqamli texnologiyalar qo'llanilmoqda. Shunday bo'lsa-da, bu usullarning ko'pchiligi murakkab geologik sharoitlarda va kon massivining o'zgaruvchan tuzilishiga nisbatan qo'llanilganda cheklovlarga duch kelmoqda. Bu esa ularning amaliy samaradorligiga putur yetkazmoqda.

Real geometrik va fizik parametrlarni hisobga olgan holda bort qiyaliklarning yanada aniq va silliq trayektoriyalarini yaratish imkonini beruvchi ayniqsa amaliy nuqtai nazardan dolzarb hisoblangan uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellarni joriy etishga alohida e'tibor qaratilmoqda. Ushbu yo'nalish maksimal ustuvorlikni ta'minlaydigan va shu bilan birga kon-qurilish resurslarini tejashga yordam beradigan karyer bortining optimal shakllarini yaratish uchun yangi imkoniyatlar ochadi. Bundan tashqari, tadqiqotlarning hozirgi holati tog' jinslarining zichligi va fizik xususiyatlarining bir xil emasligini, shuningdek, potensial sirpanish yuzalarining ta'sirini hisobga olgan holda, tog' jinslari massivining og'irlik markazini aniqlash usullarini takomillashtirish zarurligini

ko'rsatadi. Og'irlik markazi holatini aniq baholash ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyentini hisoblash va yuzaga kelishi mumkin bo'lgan deformatsiyalar va qulashlarni prognoz qilish uchun asosiy manbaa hisoblanadi.

Shuningdek, ustuvorlikni tahlil qilishda matematik modellashtirish, eksperimental tadqiqotlar va statistik korrelyatsion tahlildan foydalanishni o'z ichiga olgan kompleks yondashuv muhim jihatlardan hisoblanadi. Bunday yondashuv nafaqat hisoblashlarning aniqligini oshirish, balki muhandislik yechimlarini har bir konning o'ziga xos geologik-texnik sharoitlariga moslashtirish imkonini beradi.

Shunday qilib, nazariya va amaliyotdagi sezilarli yutuqlarga qaramay, chuqur karyerlar bortlarining barqarorligini ta'minlash muammosi dolzarbligicha qolmoqda va keyingi ilmiy tadqiqotlar va ishlanmalarni talab qiladi. Chuqur karyerlarning o'ziga xos xususiyatlariga moslashtirilgan yangi usullar va modellarni yaratish alohida ahamiyatga ega bo'lib, bu konchilik ishlarining xavfsizligini va mineral-xomashyo bazasidan foydalanish samaradorligini oshirish imkonini beradi.

**Dissertatsiya tadqiqotining Dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti Milliy texnologik tadqiqotlar universiteti "MISIS"ning Olmaliq shahridagi filiali ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining AL-21091429 – "Olmaliq kon-metallurgiya kombinati" AJ karyerlarida nogabaritlar chiqishini kamaytirishni ta'minlovchi portlatish ishlarining samarali texnologiyasini ishlab chiqish" mavzusi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** karyer bortining qavariq shaklini splayn funksiyalarga asoslangan matematik modellashtirish negizida qurish usullarini ishlab chiqish va karyer borti ustuvorligini kon massivi og'irlik markazi va ustuvorlik zaxira koeffitsiyenti tahlili asosida prognozlashdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

foydali qazilma konlarini ochiq usulda qazib olish chuqurligini oshirishning salbiy oqibatlarini kamaytirish imkonini beruvchi matematik yechimlarni tahlil qilish;

uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellarni qurish va ushbu model asosida karyer bortining qavariq shaklini kubik splayn negizida yaratish usulini ishlab chiqish;

foydali qazilma konlarini ochiq usulda qazib olishda tog' jinslari massivining og'irlik markazi koordinatalarini aniqlash jarayonini matematik modellashtirish;

karyer bortlari ustuvorligini splayn funksiya asosidagi matematik modellashtirish negizida prognozlash usulini ishlab chiqish.

**Tadqiqotning obykti** sifatida foydali qazilmalarni ochiq usulda qazib olish jarayonida geologik-texnik omillar ta'siriga uchraydigan kon massivi va karyer bortlarining qiyaliklari olingan.

**Tadqiqotning predmeti** karyer bortlari qiyaliklarining ustuvorligini va konchilik ishlari xavfsizligini ta'minlashga qaratilgan matematik usullar hisoblanadi.

**Tadqiqot usullari.** Tadqiqot jarayonida matematik modellashtirish, sonli tahlil va geomexanik hisoblash usullari, jumladan, kubik splaynlarni qo‘llash, binar bo‘lish usuli, korrelyatsion tahlil, shuningdek, ishlab chiqilgan eksperimental hisoblashlar va natijalarning qiyosiy tahlilidan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:**

uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellarni qurish va ushbu model asosida murakkab geologik va gidrogeologik sharoitlar uchun konchilik ishlarini bexatar olib borish, karyer borti qiyaliklarining optimal geometriyasini ta‘minlashga xizmat qiladigan bort qavariq trayektoriyasini qurish ishlab chiqilgan;

kubik splayn negizida qurilgan karyer borti trayektoriyasini va siljish chizig‘i bilan chegaralangan tog‘ jinslari massivi og‘irlik markazining koordinatalarini aniqlash trayektoriyasining matematik modeli asosida qiyalik ustuvorligi koeffitsiyentini va ustuvorlikni muhandislik baholash aniqligini oshirilishi asoslangan;

karyer borti trayektoriyasi qavariqligi va ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyenti orasidagi o‘zaro korrelyatsion bog‘liqlik mavjudligi to‘g‘risidagi teorema isbotlangan;

muayyan kon-geologik sharoitlar uchun karyer bortining xilma-xil geometrik konfiguratsiyasiga mos bo‘lgan ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyentlarini baholashning kompleks usullari ishlab chiqilgan va bort qiyaliklarining optimal parametrlarini aniqlash va loyihalash amaliyotida qo‘llash algoritmi va dasturlar majmui ishlab chiqilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:**

murakkab geologik va gidrogeologik sharoitlar uchun karyer bortining qavariq trayektoriyasi kubik splaynlardan foydalanib qurilgan va u konchilik ishlarini bexatar olib borish, karyer borti qiyaliklarining optimal geometriyasini ta‘minlashi isbotlangan;

uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellarni qurish va ushbu model asosida karyer bortining qavariq shaklini yaratish usulini ishlab chiqish;

karyer maydonining muayyan chegaralaridagi tog‘ jinslari massivi markazining koordinatalarini aniqlash jarayonini matematik model asosida bort qiyaligi ustuvorligi baholangan;

karyer borti trayektoriyasining qavariqlik ko‘rsatkichi bilan bort ustuvorligi zaxirasi koeffitsiyenti orasidagi bog‘liqligi to‘g‘risidagi teorema isbotlangan va mazkur korrelyatsion modeldan amaliyotda samarali foydalanish tavsiya etilgan;

karyer bortining mavjud geometrik konfiguratsiyasiga mos bo‘lgan ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyentlarini baholash uchun muayyan kon-geologik sharoitlarda ishlab chiqilgan v abort qiyaliklarining optimal parametrlari bo‘yicha loyihaviy yechimlar qabul qilish takomillashtirilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Tadqiqot natijalarining ishonchliligi o‘tkazilgan matematik hisoblashlar, uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellar, sonli modellashtirish va qiyosiy tahlillar orqali tasdiqlangan bo‘lib, ular olingan natijalarni konchilik sanoatida xavfsizlikning nazariy kutilmalari va amaliy talablariga muvofiqligini ko‘rsatadi, splayn modelni karyerlarning real geologik-

texnik sharoitlarida tekshirish esa taklif etilgan usullarning yuqori darajadagi aniqligi va ishonchliligini ko'rsatadi.

### **Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.**

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati matematik modellar va sonli usullar, jumladan, ushbu dissertatsiya ishida qurilgan uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modelni qo'llash negizida kon massivi massalari markazini aniqlash, karyer bortlari qiyaliklarining ustuvorligini prognozlashni takomillashtirish, murakkab geologik-texnik sharoitlarga loyihalash yechimlarini moslashtirish, burg'ilash va portlatish ishlari parametrlarini optimallashtirish, shuningdek, konchilik ishlarining xavfsizligi va iqtisodiy samaradorligini oshirishni ta'minlash bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati karyer borti qiyaliklarining ustuvorligini oshirish, burg'ilash va portlatish ishlarining parametrlarini optimallashtirish va konni ochish va qazib olish ishlari samaradorligini ta'minlashga qaratilgan uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellar qo'llash negizida karyer bortining qavariq trayektoriyasini loyihalash va kon massivi massalari markazini matematik aniqlashning samarali usuli ishlab chiqilganligi va uni amaliyotda qo'llaganlik bilan tavsiflanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Karyer borti qiyaliklari ustuvorligining matematik modellarini ishlab chiqish, bort geometriyasini optimallashtirish va konchilik ishlari xavfsizligini oshirish bo'yicha samarali muhandislik yechimlarini ishlab chiqish bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar asosida:

Kubik splaynlarni qo'llagan holda karyer bortining qavariq trayektoriyasini qurish usuli "Olmaliq kon-metallurgiya kombinati" AJning "Yoshlik-1" karyerida joriy etilgan ("Olmaliq kon-metallurgiya kombinati" AJning 16.10.2025-yildagi №SL-875 son ma'lumotnomasi). Natijada bort geometriyasini optimallashtirish va xavfsiz qiyaliklar maydonini qisqartirish hisobiga foydali qazilmalarni qazib olish hajmini 8% ga oshirish, qiyaliklarni mustahkamlashga sarflanadigan xarajatlarni 12% ga kamaytirish imkonini bergan;

Kon massivi massasi markazining koordinatalarini aniqlash va qiyaliklarning ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyentini hisoblash usuli "Olmaliq kon-metallurgiya kombinati" AJning "Yoshlik-1" karyerida joriy etilgan ("Olmaliq kon-metallurgiya kombinati" AJning 16.10.2025-yildagi №SL-875 son ma'lumotnomasi). Natijada, qiyaliklar ustuvorligini baholash aniqligini 18% ga oshirish, avariya xavfini 20% ga kamaytirish, shuningdek, loyiha yechimlarini optimallashtirish qiyaliklarni mustahkamlash xarajatlarini 10% ga kamaytirish imkonini bergan va konchilik ishlari unumdorligini oshirish va ekspluatatsion xarajatlarni kamaytirish imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Mazkur tadqiqot natijalari 3 ta xalqaro va 3 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 14 ta ilmiy ish chop etilgan, shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 8 ta maqola, jumladan, 5 tasi respublika va 3 tasi xorijiy jurnallarda nashr etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya tarkibi kirish, uchta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 119 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish qismida** olib borilgan tadqiqotning dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obykti va predmeti aniqlangan, tadqiqotning respublikada fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari ochib berilgan, tadqiqot natijalarining amaliyotga joriy etilishi bo'yicha tavsiyalar, e'lon qilingan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Foydali qazilma konlarini ochiq usulda qazib olish chuqurligini oshirishning salbiy oqibatlarini kamaytirish imkonini beruvchi matematik usullar tahlili”** deb nomlangan **birinchi bobida** matematik modellashtirish va konchilik ishlari masalalarini yechish usullarining umumiy tahlili keltirilgan. Modellashtirishning asosiy usullari va ularni konchilik ishlarining turli bosqichlarida qo'llash samaradorligi o'rganilgan. Asosiy e'tibor ochiq kon ishlarini olib borish xavfsizligiga, karyer bortlari va pog'onalarining ustuvorligiga, BPI (burg'ilash-portlatish ishlari)ni olib borish va rudalarni tashishga qaratilgan.

Foydali qazilma konlarini ochiq usulda qazib olishda matematik modellashtirish va sonli usullarni qo'llashning maqsadga muvofiqligi ko'rib chiqilgan. Ochiq kon ishlari chuqurligining oshishi kon-geologik sharoitlarning murakkablashishi, tashish masofasining oshishi va karyer bortlari qiyaliklarining barqarorligini saqlash bilan bog'liq qo'shimcha qiyinchiliklarni keltirib chiqaradi. Loyiha yechimlarini optimallashtirish va innovatsion texnologiyalarni joriy etish ushbu omillarning salbiy oqibatlarini minimallashtirish imkonini beradi. Shu munosabat bilan karyer rivojlanishining turli ssenariylarini prognozlash va tahlil qilish imkonini beruvchi splayn metodlar asosida matematik modellashtirish, sonli usullar va kompleks dasturlarni qo'llash alohida ahamiyat kasb etadi.

Splayn metodlar asosida qurilgan matematik modellar karyer parametrlarini prognoz qilishda muhim rol o'ynaydi. Sonli modellashtirish metodlari orqali va chekli elementlardan foydalangan holda karyer bortlari qiyaliklarining turg'unligini tahlil qilish, chiziqli dasturlash algoritmlari yordamida konchilik sohasida ishlatiladigan maxsus transportlarning harakatlanish yo'nalishlaridagi sarf-xarajatlarni minimallashtirish masalalarini optimallashtirish, ommaviy xizmat ko'rsatish tizimlari asosida transport oqimlari parametrlarini hisoblash, karyer chuqurligiga qarab kon-geologik sharoitlarning o'zgarishini modellashtirish va boshqa vazifalarni yechish imkonini beradi.

Optimallashtirish mezonlari tenglamasi:

$$F_{\text{OPT}} = \min \sum_{i=1}^n (C_{\text{TP}} + C_{\text{ЭК}} + C_{\text{УСТ}} + C_{\text{ЭН}}) \quad (1)$$

bu yerda  $i$  – pog‘onalar soni ( $i = \overline{1, n}$ ),  $C_{\text{Tp}}$  – rudani tashish xarajatlari,  $C_{\text{ЭКС}}$  – qazish xarajatlari,  $C_{\text{yCT}}$  – qiyaliklarning barqarorligini ta’minlash xarajatlari,  $C_{\text{ЭН}}$  – uskunalarni energiya bilan ta’minlash xarajatlari.

Qiyaliklar ustuvorlik koeffitsiyenti quyidagi

$$F = \frac{R}{Q}, \quad (2)$$

formula bilan aniqlanadi. Bu yerda  $R$  – ushlab turuvchi kuch,  $Q$  – buzuvchi kuch.

Konlarning genetik sinfiga va massivning holatiga qarab  $\alpha_y$  pog‘onalari va  $\alpha_\sigma$  bortlari qiyaliklarining chegaraviy ustuvor burchaklari aniqlangan:

1. I sinf konlari uchun:

$$\alpha_y = \begin{cases} 45^\circ - 50^\circ, & \text{o'rta blokli jinslar;} \\ 50^\circ - 55^\circ, & \text{yirik blokli jinslar;} \\ 60^\circ - 65^\circ, & \text{yopiq darzli yirik blokli jinslar;} \end{cases}$$

$$\alpha_\sigma = \begin{cases} 40^\circ, & \text{o'rta blokli jinslar;} \\ 46^\circ, & \text{yirik blokli jinslar;} \\ 55^\circ, & \text{yopiq darzli yirik blokli jinslar.} \end{cases}$$

2. II sinf konlari uchun:

$$\alpha_y = \begin{cases} 45^\circ - 55^\circ, & \text{ost qanot;} \\ 50^\circ - 70^\circ, & \text{ust qanot, massiv holatiga bog'liq holda;} \end{cases}$$

$$\alpha_\sigma = \begin{cases} 40^\circ - 45^\circ, & \text{ost qanot;} \\ 50^\circ - 60^\circ, & \text{ust qanot.} \end{cases}$$

Portlatish ishlari natijasida pog‘onalarning deformatsiyasi massivning buzilish tenglamasi asosida modellashtirilgan:

$$\tau_f = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

bu yerda  $\tau_f$  – yemirilishning chegaraviy urinma kuchlanishi,  $c$  – ilashish koeffitsiyenti,  $\sigma_n$  – normal kuchlanish,  $\varphi$  – ichki ishqalanish burchagi.

Portlashlar natijasida yuzaga keladigan to‘lqin jarayonlarini hisobga olish uchun muhitda elastik to‘lqinlarning tarqalish tenglamasi keltirilgan:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (4)$$

bu yerda  $u$  – massiv zarrachalarining siljishi,  $v$  – to‘lqinning tarqalish tezligi,  $x$  – fazoviy koordinata,  $t$  – vaqt.

Massivdagi kuchlanishlarning o‘zaro ta’sirini hisobga oluvchi kuchlanish tenzori:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

bu yerda  $\sigma_{ij}$  – kuchlanish tenzorining komponentalari,  $\lambda, \mu$  – Lamé koeffitsiyentlari,  $\delta_{ij}$  – Kroneker simvoli,  $\varepsilon_{kk}, \varepsilon_{ij}$  – tenzor komponentalari.

Bortning oxirgi texnologik jihatdan erishiladigan chegarasidagi qiyalik burchagi  $\alpha_\delta^t$  ni aniqlash formulasi:

$$\operatorname{tg} \alpha_\delta^t = \frac{H_\sigma}{H_\sigma \cot \alpha_y + \frac{H_\sigma}{3}(n-1) + H_\sigma B}, \quad (6)$$

bu yerda  $H_\sigma$  – bortning umumiy balandligi,  $\alpha_y$  – pog‘onaning qiyalik burchagi,

$B$  – transport bermasining kengligi,  $n$  – pog‘onalar soni  $n = \frac{H_\sigma}{H_y}$ .

Ochiq usulda qazib olish sharoitlari uchun konning matematik modelini qurish konchilik ishlarini optimallashtirishning asosiy bosqichidir. Ushbu jarayon loyihalananayotgan karyerning chuqurligi, bortlarning qiyalik burchagi, tog' jinslari massivining tuzilishi va BPI intensivligi kabi xususiyatlarini hisobga olgan holda modelning dastlabki geomexanik, geologik va texnologik parametrlarini tanlashni o'z ichiga oladi.

Uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellarda konchilik ishlarini rejalashtirishga moslashtirish uchun quyidagi jihatlar hisobga olingan:

1. Massivning geomexanik parametrlari – tog' jinslarining mustahkamlik xususiyatlari, ilashish va ichki ishqalanish koeffitsiyentlari, deformatsiyalanuvchanlik va kuchlanish-deformatsiyalanish ko'rsatkichlari;

2. Geologik sharoitlar – tog' jinslari tarkibining o'zgaruvchanligi, darzlanganlik darajasi, tektonik buzilishlar va kuchsizlanish zonalarining mavjudligi;

3. Hidrogeologik omillar – yer osti suvlari sathi, tog' jinslarining filtratsiya xususiyatlari va suvga to'yinganlikning qiyaliklar turg'unligiga ta'siri;

4. Texnologik parametrlar – konni qazib olish sxemasi, qazish ishlari olib borilayotgan pog'onalarning joylashuvi, tashish yo'nalishlari va burg'ilash-portlatish ishlari parametrlari.

Dissertatsiyaning **“Kubik splaynlar negizida karyer bortining qavariq shaklini ishlab chiqish”** deb nomlangan **ikkinchi bobi** uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellardan foydalangan holda karyer bortining qavariq shaklini qurish usulini ishlab chiqishga bag'ishlangan. Ochiq kon ishlarini olib borish jarayonida karyer bortlarining ustuvorligini ta'minlash kon lahimlarining xavfsizligiga, ochish va qazib olish ishlarining samaradorligiga ta'sir etuvchi asosiy vazifalardan biri hisoblanadi. Karyer bortining optimal trayektoriyasini shakllantirish usullaridan biri pog'onalar va qiyaliklarning silliq egri chiziqli geometriyasini qurishni ta'minlaydigan uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellardan foydalanishdir. Buning uchun uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellar tadqiq qilingan va keltirib chiqarilgan. Karyer bortining trayektoriyasini loyihalashda bortning qiyalik burchagiga alohida e'tibor beriladi, chunki bu parametr qiyaliklarning turg'unligiga, ortiqcha qazib olinadigan tog' jinslari hajmiga va kon ishlarini olib borish xavfsizligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Karyer bortining optimal shaklini aniqlash uchun pog'onalar va qiyaliklar relefining tabiiy shakllarini approksimatsiyalovchi silliq egri chiziqni qurish imkonini beruvchi uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modellar bilan interpolyatsiyalash usuli qo'llanilgan. Ushbu usul konchilikda karyerning qazish-transport sxemalari relyefini geometrik modellashtirishda, shuningdek, tog' jinslari massivlarining barqarorligini prognozlashda keng qo'llaniladi.

Amaliyotda juda ko'p hollarda (o'zi va uning hech bo'lmaganda birinchi tartibli hosilasining uzluksizligi talab qilinadigan) uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn  $S_3(x)$  modellar ko'p qo'llaniladi. Chunki faqat uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn  $S_3(x)$  modellarda nazariy asoslangan ekstremal xossasi ( $f(x)$ ) funksiyani ikkinchi tartibli hosilasining kvadratidan olingan integralga faqat uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn funksiya

minimum qiymat beradi) mavjud bo'lganligi uchun amaliy masalalar modellashtirish jarayonlarida yaqinlashish tezligi yuqoriligi bilan kata ahamiyatga ega.

Bunda  $m_i = S_3(x_i)$  kattalik splaynning  $x_i$  nuqtadagi qiymatiga deyiladi. Bu yerda  $m_i$  quyidagi formulalar orqali aniqlanadi:

$$m_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2h}, i = 1, 2, \dots, N - 1, \quad (7)$$

$$m_0 = \frac{4f_1 - f_2 - 3f_0}{2h}, m_N = \frac{3f_N - f_{N-2} - 3f_{N-1}}{2h}. \quad (8)$$

Ushbu formulalar  $h = \frac{b-a}{N}$  qadam asosida olingan ikkinchi tartibli aniqlikdagi sonli differensiallash formulalaridir.

Uchinchi darajali lokal interpolatsion splayn  $S_{3i}(x)$  modelning umumiy ko'rinishi quyidagicha bo'lsin:

$$S_{3i}(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3. \quad (9)$$

Uchinchi darajali lokal interpolatsion splayn  $S_3(x)$  modelni qurishda karyer bortining qavariq shaklini aniqlash uchun mutaxassislar tomonidan olingan eksperimental ma'lumotlar (1-jadval)dan foydalanamiz.

1-jadval

$i$	0	1	2	3	4
$x$	0	4	8	12	16
$y$	0	9	14	18	20

$y = f(x)$  funksiyasining  $x$  o'zgaruvchiga bog'liqligi bo'yicha olingan tajriba natijalari ( $i$  – nuqtalar tartib raqami,  $x$  – o'zgaruvchi qiymatlari,  $y$  – funksiya qiymatlari).

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = 0, a_1 = 9, a_2 = 14, \\ a_3 = 18, c_0 = 0, 4b_0 + 64d_0 = 9 \\ 4b_1 + 16c_1 + 64d_1 = 5 \\ b_2 + 4c_2 + 16d_2 = 1 \\ 2b_3 + 8c_3 + 32d_3 = 1 \\ b_0 - b_1 + 48d_0 = 0 \\ -c_1 + 12d_0 = 0 \\ b_1 - b_2 + 8c_1 + 48d_1 = 0 \\ c_1 - c_2 + 12d_1 = 0 \\ b_2 - b_3 + 8c_2 + 48d_2 = 0 \\ c_2 - c_3 + 12d_2 = 0 \\ c_3 + 12d_3 = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

Karyer bortining qavariq shaklini aniqlash uchun mutaxassislar tomonidan olingan eksperimental ma'lumotlardan (1-jadval) foydalanib splayn modelning interpolatsiya va chegaraviy shartlari asosida quyidagi tenglamalar sistemasini hosil qilamiz:

Qisqaroq bo'lishi uchun bu sistemani matritsa ko'rinishiga keltiriladi:  $AX = B$ , bunda  $A$  – noma'lumlar oldidagi koeffitsiyentlardan tuzilgan matritsa,  $X$  – noma'lumlar ustun-matritsasi,  $B$  – ozod sonlar ustun-matritsasi.  $AX = B$  tenglama  $X = B \cdot A^{-1}$  yechimga ega bo'lgani uchun, Excel dasturidan foydalanib

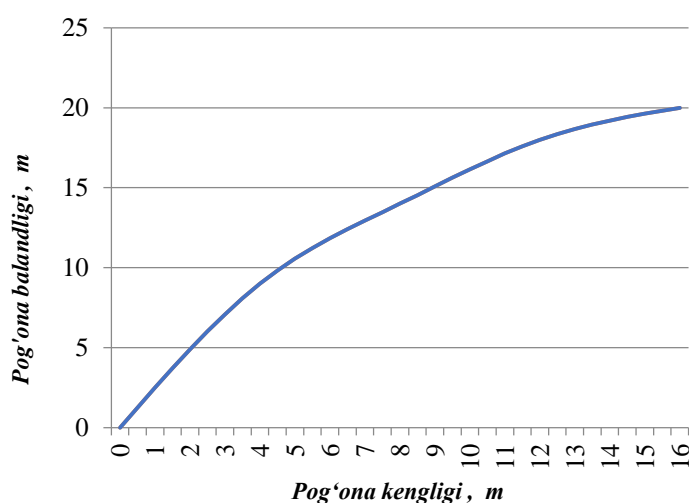
$B \cdot A^{-1}$  ko'paytma topiladi. Keyin noma'lum  $a_i, b_i, c_i, d_i$  ( $i = \overline{0,3}$ ) topilib, izlanayotgan splayn funksiya koeffitsiyentlarining qiymatlari 2-jadvalda berilgan:

2-jadval

$i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$
0	0	2,508929	0	-0,01618
1	9	1,732143	-0,1942	0,018415
2	14	1,0625	0,026786	-0,0106
3	18	0,767857	-0,10045	0,008371

Mos lokal kubik splaynlar uchun noma'lum koeffitsiyentlarning qiymatlari.

Barcha noma'lum koeffitsiyentlar aniqlangandan keyin ularni kubik splayn vositasida karyer bortining trayektoriyasining grafik ko'rinishi hosil qilindi (1-rasm).



1-rasm. Kubik splayn vositasida tuzilgan karyer borti trayektoriyasi

So'ngra, (7) va (8) formulalardan foydalanib, mos nuqtalardagi qiyalik burchak qiymatlarini topamiz, bu aslida  $y'_i = S'_i(x_i)$  funksiya uchun qiyalik burchagini aniqlash qiymatlari bo'lib, bu yerda  $i = \overline{0;3}$ :

$$tg\alpha_0 = m_0 = \frac{4y_1 - y_2 - 3y_0}{2h} = \frac{11}{4}, tg\alpha_1 = m_1 = \frac{y_2 - y_0}{2h} = \frac{7}{4},$$

$$tg\alpha_2 = m_2 = \frac{y_3 - y_1}{2h} = \frac{9}{8}, tg\alpha_3 = m_3 = \frac{y_4 - y_2}{2h} = \frac{3}{4}.$$

Og'ish burchagini graduslardagi qiymatlarini aniqlash uchun arktangens funksiyasidan foydalanamiz. Unda

$$\alpha_0 = 70^\circ, \alpha_1 = 60^\circ, \alpha_2 = 48^\circ \text{ va } \alpha_3 = 37^\circ.$$

Bortning optimal tanlangan qiyalik burchaklari bort pastki qismidan uning yuqori qismiga qarab qiyalikni asta-sekin kamaytirish orqali uning ustuvorligini ta'minlaydi.

Kubik splayn usulidan foydalanib karyer borti shaklini modellashtirishga yo'naltirilgan eksperimental hisoblashlar o'tkazilib, tadqiqot davomida quyidagilar aniqlangan:

- bort egri chizikli trayektoriyasining qiyalik burchaklari (graduslarda);
- har bir nazorat nuqtasidagi qiyalik burchaklarining tangenslari;

– bort balandligiga qarab pog‘onalar qiyalik burchaklarining o‘zgarish dinamikasini aks ettiruvchi ma’lumotlarning grafik bog‘liqligi.

Qiyaliklarning yuqori ustuvorligini, ochish ishlari hajmini kamaytirishni va konchilik ishlarini olib borish xavfsizligini oshirishni ta’minlaydigan karyer borti trayektoriyasining optimal qavariq shaklini ishlab chiqish vazifasi quyidagicha yechilgan.

Keyingi tajribalar uchun faqat 1.3 § dagidek o‘xshash hisoblashlar asosida olingan yakuniy natijalar keltirilgan. Bunday yondashuv hisoblash amaliyotlarini takrorlamasdan ma’lumotlarni tahlil qilish, natijalarni taqqoslash va karyer borti trayektoriyasining optimal shaklini asoslashga e’tibor qaratish imkonini beradi.

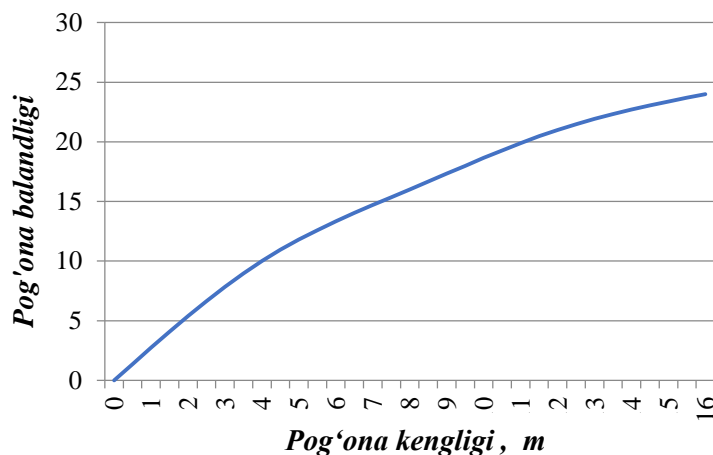
Agar tajribalar natijasida  $y = f(x)$  funksiyasining  $x$  o‘zgaruvchisiga bog‘liqligi jadval ko‘rinishida olingan bo‘lsa (3-jadval), karyer bortining trayektoriyasi quyidagicha aniqlandi.

3-jadval

$i$	0	1	2	3	4
$x$	0	4	8	12	16
$y$	0	10	16	21	24

$y = f(x)$  funksiyaning  $x$  o‘zgaruvchisiga bog‘liqligini aniqlash bo‘yicha o‘tkazilgan tajriba natijalari hisoblanadi (bunda  $i$  – nuqtalar tartib raqami,  $x$  – o‘zgaruvchi qiymatlari,  $y$  – funksiya qiymatlari).

Birinchi satr – tartib raqamlari, ikkinchi satr – qiyalik burchagi tangensining qiymatlari, uchinchi satr – burchaklarning gradus o‘lchovlaridagi qiymatlari bo‘lib 4-jadvalda keltirilgan.



2-rasm. Kubik splayn vositasida aniqlangan karyer borti trayektoriyasi

4-jadval

$i$	0	1	2	3
$tg\alpha_i = m_i$	3	2	1,3	1
$\alpha_i$	$71,57^\circ$	$63,44^\circ$	$53,97^\circ$	$45^\circ$

Aniqlangan karyer borti trayektoriyasini chizamiz:

Xuddi shu tarzda keying oraliqlarda karyer borti trayektoriyasini aniqlashda 2-, 3-, 4- va 5- tajriba oraliqlarida olingan natijalari dissertatsiyada keltirilgan.

Karyer bortining ustuvorligini ta'minlash va konchilik ishlarini olib borish xavfsizligini oshirish maqsadida uning qavariq shaklini aniqlash usullarini qiyosiy tahlil qilish masalasi dolzarb hisoblanadi. Ushbu masala ustuvorlikning geometrik va fizik modeli talablariga javob beradigan karyer borti trayektoriyasini ifodalash imkonni beradigan kubik splaynlar usulidir.

Quyida karyer (pog'ona) bortining kengligi va balandligi turli xususiy kesmalarda kubik splayn funksiyasi (9) ko'rinishida aniqlangan.

1. Kengligi 16 m va balandligi 24 m bo'lgan karyer (pog'ona) borti funksional bog'liqlik natijalari 3-jadvalda keltirilgan.

Kubik splayn funksiyalar quyidagi ko'rinishda hosil bo'ladi:

$$\begin{aligned} y_0 &= S_0 = -0,02x^3 + 2,76x; \\ y_1 &= S_1 = 0,02x^3 - 0,42x^2 + 4,75x - 2,21; \\ y_2 &= S_2 = -0,01x^3 + 0,28x^2 - 0,29x + 12,64; \\ y_3 &= S_3 = 0,01x^3 - 0,4x^2 - 7,04x - 20,14. \end{aligned}$$

Xuddi shu tarzda 2-5-bortlar uchun ham natijalar olingan.

Karyer borti kengligi va balandligi turlicha bo'lgan beshta misolda olingan natijalarni taqqoslaganda, kenglik va balandlikka qarab, karyer borti trayektoriyasi tegishlicha qavariq bo'lishi mumkin. 5-jadvalda tegishli nuqtalardagi qiyalik burchagi tangensining qiymatlari, 6-jadvalda esa shu nuqtalardagi qiyalik burchagining graduslardagi qiymatlari keltirilgan.

5-jadval

Kesmalar $tg\alpha_i$	[16; 20]	[16; 24]	[16; 28]	[20; 24]	[20; 28]
$tg\alpha_0$	2,75	3	2,875	2,8	2,6
$tg\alpha_1$	1,75	2	2,125	1,6	1,8
$tg\alpha_2$	1,125	1,3	1,625	1	1,3
$tg\alpha_3$	0,75	1	1,375	0,8	1

6-jadval

Kesmalar $\alpha_i$	[16; 20]	[16; 24]	[16; 28]	[20; 24]	[20; 28]
$\alpha_0$	70°	71,57°	70,82°	70,35°	69°
$\alpha_1$	60,26°	63,44°	64,8°	58°	61°
$\alpha_2$	48,36°	53,97°	58,39°	45°	52,44°
$\alpha_3$	37°	45°	53,95°	38,66°	45°

Ekspirimental ma'lumotlar asosida umumiy holatda berilgan eng kichik kvadratlar modeli

$\delta(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n [a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_nx_i^n - y_i]^2 \rightarrow \min$  (11)  
yordamida karyer bortining qavariq shaklini aniqlash bo'yicha korrelyatsion tahlil qilinishida foydalanildi. Xususan,  $y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$ ,  $a_0, a_1, a_2 - ?$  kvadrat

funksiya bilan yaqinlashtirishning korrelyatsion tahlili negizida karyer borti qavariq shakllari baholangan.

Dissertatsiyaning **“Karyerni ekpluatatsiya qilishda tog‘ jinslari massivining og‘irlik markazi koordinatalarini aniqlashni matematik modellashtirish”** deb nomlangan **uchinchi bobida** karyerdagi kon massivining og‘irlik markazi koordinatalarini matematik modellashtirish negizida aniqlash ishlab chiqilgan. Ustuvorlikni ta‘minlash uchun massivning potensial ustuvor bo‘lmaydigan qismida massalarning taqsimlanishi har tomonlama tahlil qilingan. Shu munosabat bilan, karyer bortining geometriyasi va mumkin bo‘lgan sirpanish tekisligi bilan chegaralangan kon massivi massalari markazining koordinatalarini aniqlash masalasi alohida o‘rin tutadi. Massalar markazining holatini bilish ta‘sir etuvchi kuchlarni modellashtirish, muvozanatni tahlil qilish va qiyaliklar ustuvorligining asosiy ko‘rsatkichi bo‘lgan ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyentini hisoblash imkonini beradi. Massalar markazining koordinatalarini aniqlash va massivni moddiy nuqta ko‘rinishida tasvirlash karyer borti yoki pog‘ona qiyaliklarining ustuvorligini tahlil qilish uchun mexanika usullaridan foydalanilgan. Ushbu tadqiqotda kon massivini moddiy nuqtalar tizimi sifatida modellashtirish taklif etilgan, ularning bo‘linishi har bir tarkibiy qismning massa markazining koordinatalarini aniqlash imkonini beradi. Ma‘lum bo‘lgan vaznli yig‘indi formulasini qo‘llab, butun massiv massa markazining koordinatalari topiladi. Bunda tog‘ jinslarining zichligi o‘zgaruvchan bo‘lishi mumkinligi hisobga olinadi, ya‘ni  $\gamma = \gamma(x, y)$  zichlik ko‘rib chiqilayotgan soha chegarasida o‘zgarishi mumkin. Hisoblashlar karyer borti va mumkin bo‘lgan sirpanish tekisligi bilan chegaralangan kontur chegarasida amalga oshiriladi, bu esa kubik splayn metodi yordamida tiklangan. Zichligi o‘zgaruvchan  $\gamma = \gamma(x, y)$  bo‘lgan yassi shaklning massalar markazi koordinatalarini hisoblashda tutash muhitlar mexanikasi qoidalari va integral hisoblash usullaridan foydalanilgan. Xususan,  $D$  soha massa markazining koordinatalari quyidagicha aniqlanadi:

$$x_c = \frac{\iint_D x\gamma(x,y)dxdy}{\iint_D \gamma(x,y)dxdy}, \quad y_c = \frac{\iint_D y\gamma(x,y)dxdy}{\iint_D \gamma(x,y)dxdy}, \quad (12)$$

bu yerda  $D$  – tekis shaklni aniqlovchi integrallash sohasi.

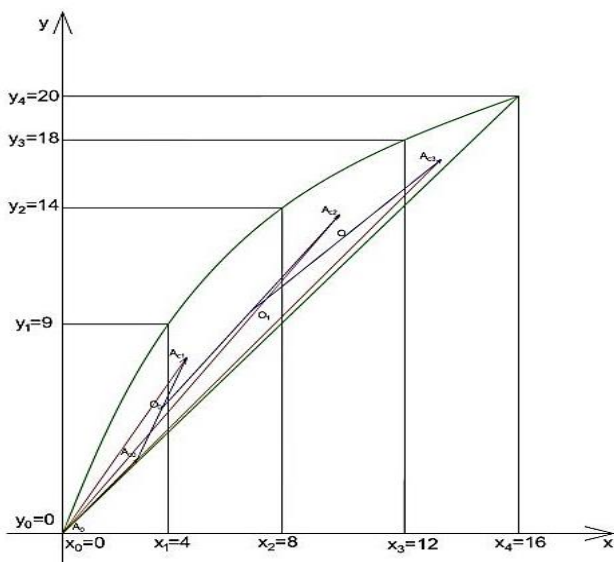
Kon tekisligining yuqori chegarasi qavariq egri chiziq bo‘lib, uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn model asosida aniqlanadi. Karyer borti bilan chegaralangan kon pog‘onasining yuqori chegarasini qurish takrorlanishini oldini olish uchun §2.1 da olingan natijalardan foydalanilgan. Geometrik jihatdan obyekt asosining uzunligi 16 shartli birlik va balandligi 20 shartli birlik bo‘lgan tekis soha ko‘rinishida ifodalanadi. Har bir xususiy soha  $O_i$  massalar markazining koordinatalari (12) formulalar asosida aniqlangan. Keyingi qadam integrallash chegaralarini formallashtirish bo‘lib,  $D_i$ ,  $i = \overline{1, 4}$  kabi belgilanadi. Har bir qisman kisma uchun  $x \in (x_i; x_{i+1})$  ga mos keluvchi  $D_i$  soha, yuqoridan uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn model bilan berilgan  $S_{3i}(x)$  orqali, pastdan esa  $(x_i; 0)$  va  $(x_{i+1}; 0)$ , shuningdek, chap va o‘ng chegaralarni hosil qiluvchi  $x = x_i$  va  $x = x_{i+1}$  vertikal chiziqlar bilan ifodalanadi. Tavsiflangan konfiguratsiyaning

geometrik tasviri 3-rasmda keltirilgan. Natijada, kon massivi bo'lingan qismlari massa markazi  $O_i$  ning quyidagi koordinatalari aniqlangan:

$$(x_{c0} = 2,634; y_{c0} = 3,432), (x_{c1} = 6,548; y_{c1} = 6,197), \\ (x_{c2} = 10,027; y_{c2} = 15,047), (x_{c3} = 14,017; y_{c3} = 19,308).$$

Oraliq hisoblashlardan holi bo'lgan, yakuniy natijaga teng bo'ladi:  $x_c = 8; y_c = 13,25$ .

U holda  $D$  soha bilan chegaralangan kon massivining izlanayotgan massa markazi bo'ladi:  $O(x_c, y_c) = O(8; 13,25)$ .



**3-rasm. Kon massivi massalar markazining koordinatalarini aniqlashning grafik tasviri**

$O(x_c, y_c)$  nuqtadan kon massivining massa markazi sifatida foydalanib, unga ta'sir etuvchi kuchlarni, ya'ni ushlab turuvchi va siljitivchi kuchlarni aniqlash mumkin. So'ngra bu kuchlarning nisbatini topib, pog'ona uchun ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyenti aniqlangan. Ko'rib chiqilgan usul ustuvorlik zaxira koeffitsiyentini oddiyroq usulda aniqlash imkonini beradi.

Karyer bortining ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyentini aniqlash uchun tog' jinslari massalari markazining koordinatalarini qo'llash masalasi ko'rib chiqilgan. Ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyenti tog' jinsini ushlab turuvchi kuchlarning uni siljitivchi kuchlarga nisbati sifatida aniqlanadi, ya'ni:

$$K = \frac{|\bar{K}_{y_d}|}{|\bar{K}_{c_d}|}, \quad (13)$$

bu yerda  $\bar{K}_{y_d}$  – ushlab turuvchi kuchlar vektori,  $\bar{K}_{c_d}$  – siljitivchi kuchlar vektori.

Tog' jinsini ushlab turuvchi va siljitivchi kuchlarni vektor ko'rinishida ifodalash mumkin bo'lganligi sababli, ularning har birini koordinata o'qlari bo'yicha komponentlar yig'indisi ko'rinishida berish maqsadga muvofiq.

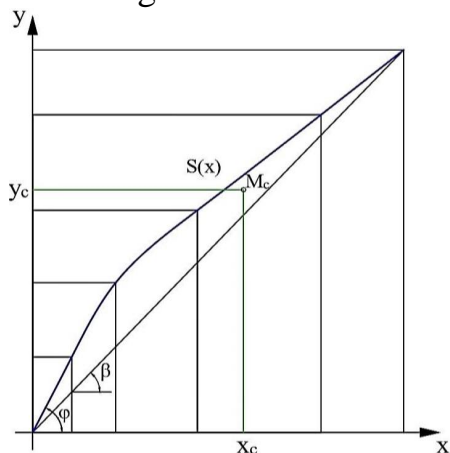
$\bar{K}_{y_d}$  va  $\bar{K}_{c_d}$  vektorlarining o'zgarish tezligini tog' jinslarining massa markazi koordinatalarini aniqlaydigan  $M_c(x_c; y_c)$  nuqtasida, ushbu vektorlarning gradiyenti sifatida ifodalaymiz. Natijada ushlab turuvchi  $\bar{K}_{y_d}$  va siljitivchi  $\bar{K}_{c_d}$  kuchlarning son qiymatlari topiladi.

U holda bu kuchlarning nisbati ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyenti sifatida oson aniqlanadi. Ustuvorlik zaxira koeffitsiyentini aniqlash formulasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$K = \frac{|\bar{K}_{y_d}|}{|\bar{K}_{c_d}|} = \frac{\text{grad}\bar{K}_{y_d}(M_c) + \text{tg}(\varphi - \beta)}{\text{grad}\bar{K}_{c_d}(M_c) + \text{tg}\beta}. \quad (14)$$

Shunday qilib, keltirilgan (14) formula bo'yicha tog' jinsining ustuvorlik zaxira koeffitsiyentini massa markazining koordinatalari  $M_c(x_c; y_c)$ ,  $\text{grad}\bar{K}_{y_d}(M_c)$  va  $\text{grad}\bar{K}_{c_d}(M_c)$  larning o'zgarish tezligi hisoblanadigan nuqta

sifatida olingan. Natijada  $K = \frac{|\bar{K}_{yD}|}{|\bar{K}_{cD}|}$  ifodaning sonli qiymati ( $K$ ) ni hisoblashda qulaylik yaratadi. Massa markazining koordinatalari  $M_c(x_c; y_c)$  4-rasmda tasvirlangan.



**4-rasm.**  $S(x)$  – karyer bortining konturini belgilovchi egri chiziq,  $\beta$  –  $Ox$  o‘qi bilan qiya chiziq orasida hosil bo‘lgan burchak,  $\varphi$  –  $Ox$  o‘qi bilan  $S(x)$  egri chiziq‘iga o‘tkazilgan urinma orasidagi burchak.

Karyer bortining ustuvorlik zaxira koeffitsiyentini baholash masalasi kubik splaynlar usuli va pog‘ona trayektoriyasining qiyalik burchaklarini tahlil qilish asosida ko‘rib chiqiladi. Ustuvorlik zaxira koeffitsiyenti ushlab turuvchi kuchlar yig‘indisining siljituvchi kuchlarga nisbati sifatida baholanadi.

Ushlab turuvchi kuchlar  $x_i$  nuqtalarda splayn egri chiziq‘iga urinmalarning qiyalik burchaklari tangenslari bilan ifodalanadi, bunda  $i = \overline{1, n-1}$ , ya‘ni urinma va gorizont orasidagi burchaklar orqali aniqlanadi. Siljituvchi kuchlar  $\varphi_i - \beta$  burchaklar orqali aniqlanadi, bu yerda  $\beta$  – kon massivining sirpanish chiziq‘ining qiyalik burchagi. Shuningdek, mumkin bo‘lgan sirpanish ta‘sirini hisobga olgan holda  $tg\beta$  qiymati ham inobatga olinadi.

Karyer bortining UZK ( $K$ ) ni baholashda, uni bort trayektoriyasini ifodalovchi egri chiziqqa urinmalar orasida hosil bo‘lgan  $\varphi_i$  burchaklar tangenslarining yig‘indisini  $x_i$  nuqtalarda, bunda  $i = \overline{1, n-1}$ ,  $tg(\varphi_i - \beta) + tg\beta$  qiymatlari yig‘indisiga nisbati sifatida ko‘rib chiqilgan. Bu yerda  $\beta$  – tog‘ jinsining potensial sirpanish tekisligining qiyalik burchagidir. Bunda  $\varphi_i$  burchaklar tangenslari ushlab turuvchi kuchlarning komponentlari sifatida talqin qilinadi,  $tg(\varphi_i - \beta) + tg\beta$  ifodalari esa tog‘ jinslari massivida ta‘sir etuvchi siljituvchi kuchlarni tavsiflab beradi.

Agar

$$K_{yD} = tg\varphi_1 + tg\varphi_2 + tg\varphi_3 + \dots + tg\varphi_{n-1} \quad \text{va}$$

$$K_{cD} = tg(\varphi_1 - \beta) + tg(\varphi_2 - \beta) + tg(\varphi_3 - \beta) + \dots + tg(\varphi_{n-1} - \beta) + tg\beta,$$

deb olinsa, u holda quyidagiga ega bo‘lamiz:

$$K = \frac{|\bar{K}_{yD}|}{|\bar{K}_{cD}|} = \frac{tg\varphi_1 + tg\varphi_2 + tg\varphi_3 + \dots + tg\varphi_{n-1}}{tg(\varphi_1 - \beta) + tg(\varphi_2 - \beta) + tg(\varphi_3 - \beta) + \dots + tg(\varphi_{n-1} - \beta) + tg\beta}. \quad (15)$$

Karyer borti ustuvor bo‘lishi uchun  $K > 1$  shart bajarilishi talab etiladi. Ushbu shartning bajarilishi quyidagi hollarda ta‘minlanadi:

- 1)  $\varphi_1 > \varphi_2 > \dots > \varphi_{n-1}$ , ya‘ni  $\varphi_i$  burchaklari, bunda  $i = \overline{1, n-1}$ , karyer pastki qismidan yuqori qismigacha kamayuvchi ketma-ketlikni hosil qilsa;
- 2)  $\varphi_{n-1} > \beta$ , ya‘ni  $\varphi_{n-1}$  burchaklarning eng kichigi har doim kon massivining  $\beta$  – sirpanish qiyalik burchagidan katta bo‘lsa.

Shunday qilib, bu yerda quyidagi teorema isbotlangan.

**Teorema.** Agar karyer bortining trayektoriyasi kubik splayn ko‘rinishida olingan  $y = S(x)$  qavariq silliq egri chiziq bo‘lsa, u holda quyidagi shartlar bajarilganda:

1)  $\varphi_1 > \varphi_2 > \dots > \varphi_{n-1}$ , ya'ni  $\varphi_i$  burchaklar, bu yerda  $i = \overline{1, n-1}$ , kamayuvchi ketma-ketlikni hosil qilsa;

2)  $\varphi_{n-1} > \beta$ , ya'ni  $\varphi_{n-1}$  burchaklarning eng kichigi har doim kon massivining  $\beta$  – sirpanish qiyalik burchagidan katta bo'lsa, bunda  $\varphi_i$  egri chiziqning  $x_i$  nuqtalaridagi urinmalar va  $Ox$  o'qi o'rtasida hosil bo'lgan burchaklar, u holda karyer borti ustuvor va ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyenti  $K > 1$  bo'ladi.

Turli sharoitlarda amalga oshirilgan baholashlar shuni ko'rsatdiki, bortlar barqarorligini ta'minlash uchun zarur bo'lgan zaxira koeffitsiyenti boshlang'ich ma'lumotlarning ishonchlilik darajasi va ularning toifalariga qarab, odatda 1,1–1,5 oralig'ida o'zgaradi. Qazib olinishi kerak bo'lgan kon massivining geometrik va mexanik xususiyatlarini hisoblash asosida uning turg'unligini baholash masalasi ko'rib chiqilgan. Og'ish burchagining tangensini va og'irlik markazining ishqalanish burchagining tangensini topamiz. Bu miqdorlar quyidagicha aniqlanadi:

1) qiyalik burchagining tangensi, aniqrog'i, kon massivining sirpanish chizig'i bilan absissa o'qi orasida hosil bo'lgan burchak tangensi,  $y_4$  balandlikning  $x_4$  kenglikka nisbati sifatida topiladi, ya'ni  $tg\beta = \frac{y_4}{x_4}$ .

2) og'irlik markazining ishqalanish burchagi tangensini, aniqrog'i, koordinatalar boshini va massalar markazini absissalar o'qi bilan tutashtiruvchi kesma orasida hosil bo'lgan burchak tangensini  $M_C(x_c; y_c)$  nuqta koordinatasining nisbati sifatida topamiz, ya'ni.  $tg\varphi = \frac{y_c}{x_c}$ . Keyin og'irlik markazining ishqalanish burchagi tangensini sirpanish chizig'iga og'ish burchagi tangensiga nisbatan topamiz va bu kattalikni  $K = \frac{tg\varphi}{tg\beta}$  orqali belgilaymiz. Yuqoridagi ta'kidlarni tasdiqlash uchun kon massivining kengligi va balandligi har xil bo'lgan misollarda keltirilgan. Kengligi 16 m, balandligi 20 m bo'lgan kon massivi ko'rib chiqilgan. Kubik splayn va sirpanish chizig'ini tavsiflovchi egri chiziq o'rtasida chegaralangan kon massivining og'irlik markazi koordinatalarini, shuningdek, ustuvorlik zaxirasi koeffitsiyentini topish talab etiladi. Qo'yilgan masala quyidagicha yechilgan.  $A_0(0; 0)$ ,  $A_1(4; 9)$ ,  $A_2(8; 14)$ ,  $A_3(12; 18)$  va  $A_4(16; 20)$  koordinatalari bilan kon massivining trayektoriyasi bo'lib xizmat qiluvchi egri chiziq bo'ylab joylashgan nuqtalarni belgilaymiz  $(x_i; y_i)$  bunda  $i = \overline{0; 4}$ . Yuqoridagi mulohazalarning takrorlanishiga yo'l qo'ymaslik uchun quyidagilarni keltiramiz: og'irlik markazi koordinatasining oxirgi natijasi  $M_C(x_c; y_c)$ :

$M_C = \frac{M_{C_{11}} + M_{C_{12}}}{2} = (8; 13,25)$ . Qiyalik burchagi tangensi va og'irlik markazining ishqalanish burchagi tangensi:  $tg\beta = \frac{10}{8} = 1,25$ ,  $tg\varphi = \frac{13,25}{8} = 1,656$ .

Og'ish burchagi tangensining og'irlik markazining ishqalanish burchagi tangensiga nisbati:  $K_1 = \frac{tg\varphi}{tg\beta} = \frac{1,656}{1,25} \approx 1,325 > 1$ .  $K_1 > 1$  bo'lgani uchun kon massivini ustuvor deb qabul qilish mumkin. Xuddi shu tarzda 2-5 misollar uchun hisoblashlarni amalga oshirib, 7-jadvalda keltirilgan natijalarni olamiz:

Olingan natijalarni taqqoslaganda:  $K_1 = 1,33$  bo'lsa karyer borti ancha ustuvor va  $K_3 = 1,17$  bo'lganda ustuvorligi kamroq degan xulosaga kelingan.

7-jadval

<b><math>i</math> - holatlar</b>	<b>Kengligi va balandligi</b>	<b><math>K_i</math> - UZK</b>
1	16 va 20 m	$K_1 = 1,33$
2	16 va 24 m	$K_2 = 1,27$
3	16 va 28 m	$K_3 = 1,17$
4	20 va 24 m	$K_4 = 1,29$
5	20 va 28 m	$K_5 = 1,23$

**Birinchi ustun – holatlar raqamlari, ikkinchi ustun – kon massivining kengligi va balandligi, uchinchi ustun - karyer bortining UZK ko'rsatkichi.**

## XULOSA

“Karyerda ishlash jarayonlarini matematik modellashtirish: asosiy parametrlarni tahlil qilish, optimallashtirish va prognozlash” mavzusidagi texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlarga asoslangan holda nazariy va amaliy ahamiyatga ega bo'lgan quyidagi xulosalar taqdim etildi:

1. Kayerlardagi konchilik ishlari samarali va xavfsiz olib borishni ajralmas qismi hisoblangan matematik modellashtirish va sonli hisoblashning zamonaviy usullari qo'llanilgan.

2. Karyer borti trayektoriyasining qavariq shaklini qurish uchun uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modelini qo'llash bo'yicha tadqiqotlar olib borilgan.

3. O'zgaruvchi va funksiya qiymatlari keltirilgan jadval asosida berilgan funktsiyani interpolyatsiya qiluvchi egri chiziq ko'rinishidagi kubik splayn-funksiya yaratilgan.

4. Kon massivi og'irlik markazining koordinatalarini aniqlashning matematik modeli ishlab chiqilgan va asoslangan.

5. Uchinchi darajali lokal interpolyatsion splayn modelni qurish, ushbu model asosida karyer bortining silliq qavariq trayektoriyasini hosil qilish va keyinchalik kon massivining massa markazi holati mezoni bo'yicha ustuvorlik zaxirasi ko'effitsiyentini aniqlashni o'z ichiga olgan usul taklif etilgan va teorema isbotlangan.

6. Turli geometrik shakllar (kenglik va balandlik o'zgarishlari) uchun karyer bortining ustuvorlik zaxirasi ko'effitsiyenti hisoblangan va amaliy masalalar qo'llanilgan.

7. Matematik analiz usullari va vektorlarni qo'shish teoremasidan foydalanib, qazib olinishi lozim bo'lgan kon massivini ifodalovchi murakkab geometrik shaklning natijaviy massa markazi koordinatalari hisoblab chiqilgan.

8. Murakkab kon-geologik sharoitlar uchun karyer borti ustuvorligini matematik modellarni maqsadli qo‘llash negizida prognoz qilishning kompleks usuli ishlab chiqilgan.

**РАЗОВЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.03/2025.27.12.T.02.07 ПО  
ПРИСУЖДЕНИЮ НАУЧНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИМЕНИ  
ИСЛАМА КАРИМОВА**

---

**НАВОИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**НОРОВ ГУЛОМЖОН МИРЗОГОЛИБ УГЛИ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ КАРЬЕРА: АНАЛИЗ, ОПТИМИЗАЦИЯ И  
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

**04.00.17 – Физические процессы горного производства;  
05.01.07 – Математическое моделирование. Численные методы и комплексы  
программ**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей квалификационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Респ. Узбекистан за № В2024.4.PhD/Г5059.

Диссертация выполнена в Навоийском государственном университете.  
Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета по адресу (www.tdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу (www.ziynet.uz).

**Научные руководители:** **Насиров Уткир Фатидинович**  
доктор технических наук, профессор  
**Худайбердиев Ойбек Жумабоевич**  
доктор философии (PhD) по физико-математическим наукам, доцент

**Официальные оппоненты:** **Казаков Азиз Нигманович**  
доктор философии (PhD) по техническим наукам, доцент  
**Бахромов Сайфиддин Акбарович**  
доктор технических наук (DSc), доцент

**Ведущая организация:** **Университет геологических наук**

Защита диссертации состоится «24» 04 2026 года в «14<sup>30</sup>» часов на заседании Научного совета PhD.03/2025.27.12.Г.02.07 при Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел./факс: (99871) 207-44-40/207-14-64, e-mail: tadqiqotchi@tdtu.uz).

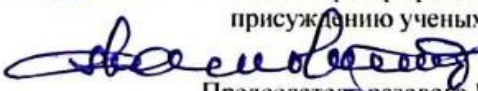
С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова (регистрационный № 97). Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел./факс: (99871) 207-44-40/207-14-64.

Автореферат диссертации разослан «09» 04 2026 года.  
(реестр протокола рассылки № \_\_\_\_\_ от «09» 04 2026 года.)



  
**Ж.Б. Тошов**  
Председатель разового Научного совета по присуждению ученых степеней, доктор технических наук, профессор

**Т.О. Комилов**  
Ученый секретарь разового Научного совета по присуждению ученых степеней, PhD, доцент

  
**С.С. Сайитдиқосимов**  
Председатель разового Научного семинара при Научном совете по присуждению ученой степени, доктор технических наук, профессор

## ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире современном этапе развития горнодобывающей промышленности характеризуется необходимостью вовлечения в эксплуатацию все более глубоких горизонтов месторождений полезных ископаемых. Это, в свою очередь, приводит к существенному усложнению геомеханических условий ведения открытых горных работ, увеличению протяженности и высоты бортов карьеров, а также к росту напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Возрастающие риски нарушения устойчивости откосов становятся ключевым ограничивающим фактором при проектировании и эксплуатации глубоких карьеров. В условиях высокой степени неопределенности геологических и технологических факторов возрастает значения применения математического моделирования и численных методов для оценки устойчивости откосов и оптимизации параметров разработки. Одним из перспективных направлений в этом контексте является построение выпуклой формы борта карьера с использованием аналитических и численных методов, в том числе сплайн-интерполяции, позволяющей более гибко и точно описывать траектории уступов с учетом природных и техногенных факторов. Широко используются модели локальных интерполяционных сплайнов третьего порядка  $S_3(x)$ . Поскольку только модели локальных интерполяционных сплайнов третьего порядка  $S_3(x)$  обладают теоретически обоснованным свойством экстремума, они имеют большое значение в процессах моделирования практических задач благодаря высокой скорости сходимости. Поэтому использование моделей локальных интерполяционных сплайнов третьего порядка  $S_3(x)$  в развитии науки и техники, особенно в горнодобывающей промышленности, является одним из наиболее актуальных вопросов с практической точки зрения.

На сегодняшний день в мире ведутся научные исследования по разработке и совершенствованию методов обеспечения устойчивости откосов и бортов глубоких карьеров, в которых особое внимание уделяется применению математического моделирования и численных методов для точного прогнозирования устойчивости, оптимизации геометрии откосов и минимизации рисков техногенных обрушений, что особенно актуально в условиях усложняющихся горно-геологических и техногенных факторов при разработке месторождений на больших глубинах. В связи с этим, уделяется особое внимание разработке эффективных математических моделей, позволяющих учитывать геометрию массива, физико-механические свойства горных пород и воздействие внешних нагрузок для обеспечения устойчивости откосов и рационального проектирования параметров бортов карьера.

В Республике выполняются ряд научно-практических работ по повышению устойчивости откосов и бортов карьеров, направленных на адаптацию современных методов математического моделирования к специфическим геолого-техническим условиям месторождений,

разрабатываемых открытым способом. В Указе Президента Республики Узбекистан<sup>1</sup> определены важные задачи по «внедрению инновационных технологий и научных разработок в горнодобывающую промышленность, реализации единой государственной политики в области геологического изучения, использования и охраны недр, а также повышению эффективности геологоразведочных работ и воспроизводства минерально-сырьевой базы отраслей экономики с учетом создания новых промышленных мощностей на местах». В связи с этим для рационального выбора параметров бортов карьера важное значение имеет внедрение локальных интерполяционных сплайн-моделей третьего порядка и численных методов, позволяющих учитывать геометрию массива, физико-механические свойства горных пород и влияние внешних нагрузок.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указах Президента Республики Узбекистан №УП-60 от 28 января 2022 г. «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», №УП-4707 от 4 марта 2015 г. «О программе мер по обеспечению структурных преобразований, модернизации и диверсификации производства в 2015-2019 гг.» и Постановлении Президента Республики Узбекистан №ПП-4124 от 17 января 2019 г. «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности предприятий горно-металлургической отрасли», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в этой сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологии республики: VII. «Науки о Земле (геология, геофизика, сейсмология и переработка минерального сырья)».

**Степень изученности проблемы.** Значительное развитие теории и практики обеспечения устойчивости откосов и бортов карьеров было достигнуто благодаря применению методов математического моделирования, численных методов и геомеханического анализа. Однако существующие подходы требуют дальнейшей адаптации и совершенствования с учётом усложняющихся геолого-технических условий и возрастания глубины разработки месторождений, что делает актуальной задачу разработки новых методик оптимизации формы откосов и повышения безопасности горных работ.

В настоящее время в научной литературе широко рассматриваются различные методы оценки устойчивости откосов, включая классические аналитические подходы, конечно-элементное моделирование, в частности, модели сплайнов локальной интерполяции третьего порядка, демонстрируют высокие результаты с практической точки зрения методы предиктивной

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан №УП-116 от 27 июля 2023 года «О мерах по эффективной организации государственного управления в сфере горнодобывающей промышленности и геологии в рамках административных реформ».

аналитики и современные численные технологии. Тем не менее, многие из этих методов имеют ограничения при применении к сложным геологическим условиям и вариабельной структуре горного массива, что снижает их практическую эффективность. Особое внимание уделяется разработке и внедрению аппроксимирующих функций, таких как кубические сплайны, с практической точки зрения особенно актуальны модели сплайнов локальной интерполяции третьего порядка, позволяющих получать более точные и гладкие траектории откосов с учетом реальных геометрических и физических параметров. Это направление открывает новые возможности для создания оптимальных форм борта карьера, которые обеспечивают максимальную устойчивость и одновременно способствуют экономии горно-строительных ресурсов. Кроме того, современное состояние исследований показывает необходимость совершенствования методов определения центра тяжести горного массива, учитывающего неоднородность плотности и физических характеристик горных пород, а также влияние потенциальных поверхностей скольжения. Точная оценка положения центра тяжести является ключевым фактором для расчета коэффициента запаса устойчивости и прогнозирования возможных деформаций и обрушений.

Важным аспектом является также комплексный подход к анализу устойчивости, который включает использование математического моделирования, экспериментальных исследований и статистического корреляционного анализа. Такой подход позволяет не только повысить точность расчетов, но и адаптировать инженерные решения под конкретные геолого-технические условия каждого месторождения.

Таким образом, несмотря на существенные успехи в теории и практике, проблема обеспечения устойчивости откосов глубоких карьеров остается актуальной и требует дальнейших научных исследований и разработок. Особое значение приобретает создание новых методик и моделей, адаптированных к специфике глубоких карьеров, что позволит повысить безопасность горных работ и эффективность использования минерально-сырьевой базы.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ филиала Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» в городе Алмалык на тему: AL-21091429 – «Разработка эффективной технологии взрывных работ, обеспечивающей снижение выхода негабаритов на карьерах АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат».

**Целью исследования** разработка методов построения выпуклой формы борта карьера на базе математического моделирования на основе сплайн-функций и прогнозирование устойчивости борта карьера на основе анализа центра тяжести горного массива и коэффициента запаса устойчивости.

### **Задачи исследования:**

анализ математических решений, позволяющих снизить отрицательные последствия увеличения глубины разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом;

построение моделей локальных интерполяционных сплайнов третьего порядка и на основе этой модели разработать способ создания выпуклой формы борта карьера;

математическое моделирование процесса определения координат центра тяжести массива горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом;

разработка метода прогнозирования устойчивости бортов карьера на базе математического моделирования на основе сплайн-функции.

**Объектом исследования** являются горный массив и откосы бортов карьера, подвергающиеся воздействию геолого-технических факторов в процессе разработки полезных ископаемых открытым способом.

**Предметом исследования** являются математические методы, направленные на обеспечение устойчивости откосов бортов карьеров и безопасности горных работ.

**Методы исследований.** В процессе исследования использовались методы математического моделирования, численного анализа и геомеханических расчетов, включая применение кубических сплайнов, метод бинарного деления, корреляционный анализ, а также разработанные экспериментальные расчеты и сравнительный анализ результатов.

### **Научная новизна исследования заключается в следующем:**

разработано построение моделей локальных интерполяционных сплайнов третьего порядка и на основе этой модели построение выпуклой бортовой траектории, обеспечивающей безопасное ведение горных работ для сложных геологических и гидрогеологических условий, оптимальную геометрию откосов борта карьера;

обосновано повышение точности инженерной оценки и коэффициента устойчивости склона на основе математической модели с определением траектории бортов карьера и координаты центра массива горных пород ограниченного линией сдвига построенного на кубическом сплайне;

доказана теорема о наличии корреляционной зависимости между выпуклостью траектории борта карьера и коэффициентом запаса устойчивости;

разработаны комплексные методы оценки коэффициентов запаса устойчивости, соответствующих различным геометрическим конфигурациям бортов карьеров для конкретных горно-геологических условий и разработан алгоритм и комплекс программ для определения оптимальных параметров бортовых откосов и их применения в проектной практике;

### **Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

выпуклая траектория борта карьера для сложных геологических и гидрогеологических условий построена с использованием кубических

сплайнов, что позволяет безопасно вести горные работы и обеспечивает оптимальную геометрию откосов борта карьера;

построить модели локальных интерполяционных сплайнов третьего порядка и разработать метод создания выпуклой формы борта карьера на основе этой модели;

достигнута практическая оценка устойчивости бортового откоса на основе математической модели процесса определения координат центра массива горных пород на определенных границах карьерного поля;

доказана теорема о взаимосвязи показателя выпуклости траектории борта карьера с коэффициентом запаса устойчивости борта и рекомендовано эффективное использование данной корреляционной модели на практике;

для оценки коэффициентов запаса устойчивости, соответствующих существующей геометрической конфигурации борта карьера, усовершенствовано принятие проектных решений по оптимальным параметрам разработанных в конкретных горно-геологических условиях откосов аборта.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов исследования подтверждена проведенными математическими расчётами, численными моделированиями и сравнительным анализом, которые показали соответствие полученных данных теоретическим ожиданиям и практическим требованиям безопасности в горнодобывающей отрасли, а верификация сплайн модели на реальных геолого-технических условиях карьеров обеспечила высокую степень точности и надёжности предложенных методик.

#### **Научная и практическая значимость результатов исследований.**

Научная значимость результатов исследования обосновывается разработкой математических моделей и численных методов, включая модель локального интерполяционного сплайна третьего порядка, разработанную в данной диссертации, на базе применения кубических сплайнов и анализа центра масс горного массива, позволяющие повысить точность прогнозирования устойчивости откосов бортов карьеров, адаптировать проектные решения к сложным геолого-техническим условиям, оптимизировать параметры откосов бортов карьера, а также обеспечить повышение безопасности и экономической эффективности горных работ.

Практическая значимость результатов исследования характеризуется разработкой эффективной методики проектирования выпуклой траектории борта карьера с использованием кубических сплайнов, модели сплайнов локальной интерполяции третьего порядка и математического определения центра масс горного массива, обеспечивающей повышение устойчивости откосов, снижение риска аварийных ситуаций, оптимизацию геометрии бортов карьера и сокращение затрат на вскрышные и добычные работы.

**Внедрение результатов исследования.** На основе проведенных исследований по разработке математических моделей устойчивости откосов, оптимизации геометрии бортов карьеров и эффективных инженерных решений по повышению безопасности ведения горных работ:

метод построения выпуклой траектории борта карьера с применением кубических сплайнов внедрен на карьере «Ёшлик-1» АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» (справка АО и «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» №SL-875 от 16.10.2025 г.). В результате достигнута повышения коэффициента запаса устойчивости откосов на 15%, снижение затраты на укрепление откосов на 12%, а также увеличения объёма добычи полезных ископаемых на 8% за счёт оптимизации геометрии борта и сокращения площади безопасных откосов;

методика определения координат центра масс горного массива и расчёта коэффициента запаса устойчивости откосов внедрен на карьере «Ёшлик-1» АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» (справка АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» №SL-875 от 16.10.2025 г.). В результате обеспечено повышение точности оценки устойчивости откосов на 18%, снижение аварийных рисков на 20%, а также оптимизация проектных решений позволяющие сократить затраты на укрепление откосов на 10%, что способствовало увеличению производительности горных работ и снижению эксплуатационных затрат.

**Апробация результатов исследования.** Апробация результатов данного исследования проведена на 3 международных и 3 республиканский научно-практических конференциях.

**Опубликованность результатов исследования.** По теме диссертации опубликованы всего 14 научных работ, из них в научных изданиях, рекомендованных для издания основных научных результатов диссертаций Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, изданы 8 статей, в том числе 5 из которых в республиканских и 3 в зарубежных журналах.

**Структура и объем диссертации.** Структура диссертации состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 119 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обосновывается актуальность и востребованность, цель и задачи исследования, характеризуются объект и предмет, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, излагаются научная новизна и практические результаты исследования, раскрываются научная и практическая значимость полученных результатов, рекомендаций по внедрению в практику результатов исследования, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

**В первой главе** диссертации «Анализ математических решений способствующих уменьшению отрицательный последствий углубления добычи полезных ископаемых открытым способом» проведен общий анализ математического моделирования и методов решения задач горных работ. Исследованы и приведены основные методы моделирования и их

эффективности применения в различных этапах проведения горных работ. Основное внимание уделено на безопасности ведения открытых горных работ, устойчивости бортов карьера и уступов, транспортировки руд и пород с учетом БВР.

Приведен критический анализ целесообразности применения математического моделирования и численных методов при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. Увеличение глубины открытых горных работ создаёт дополнительные сложности, связанные с ухудшением горно-геологических условий, транспортировки горной массы и затрат на поддержание устойчивости откосов бортов карьеров. Оптимизация проектных решений и внедрение инновационных технологий позволяют минимизировать негативные последствия данных факторов. В связи с этим особую значимость приобретает применение математического моделирования на основе сплайн методов, численных методов и комплексных программ, позволяющих прогнозировать и анализировать различные сценарии развития горных работ.

Построенные, на основе сплайн методов, математические модели играют важную роль в прогнозировании параметров карьера. Использование методов численного моделирования позволяет анализировать устойчивость откосов бортов карьеров с применением конечных элементов, оптимизировать маршруты движения специальной техники, используемых в горной области, а также задачи минимизации дорожных расходов с помощью алгоритмов линейного программирования, рассчитывать параметры транспортных потоков на основе систем массового обслуживания, моделировать изменения горно-геологических условий в зависимости от глубины карьера и др.

Приведены уравнения критерий оптимизации:

$$F_{\text{опт}} = \min \sum_{i=1}^n (C_{\text{тр}} + C_{\text{экс}} + C_{\text{уст}} + C_{\text{эн}}) \quad (1)$$

где  $i$  – число ступеней ( $i = \overline{1, n}$ ),  $C_{\text{тр}}$  – затраты на транспортировку руды,  $C_{\text{экс}}$  – затраты на экскавацию,  $C_{\text{уст}}$  – затраты на обеспечение устойчивости откосов,  $C_{\text{эн}}$  – затраты на энергоснабжение оборудования.

Ниже приведена формула расчета коэффициента устойчивости откоса:

$$F = \frac{R}{Q}, \quad (2)$$

где  $R$  – удерживающая сила,  $Q$  – разрушающая сила.

Определены предельные устойчивые углы откосов уступов  $\alpha_y$  и бортов  $\alpha_b$ , в зависимости от генетического класса месторождений и состояния горных пород массива:

1. Месторождения I класса:

$$\alpha_y = \begin{cases} 45^\circ - 50^\circ, & \text{среднеблочные породы;} \\ 50^\circ - 55^\circ, & \text{крупноблочные породы;} \\ 60^\circ - 65^\circ, & \text{крупноблочные породы с сомкнутыми трещинами;} \end{cases}$$

$$\alpha_6 = \begin{cases} 40^\circ, & \text{среднеблочные породы;} \\ 46^\circ, & \text{крупноблочные породы;} \\ 55^\circ, & \text{крупноблочные породы с сомкнутыми трещинами.} \end{cases}$$

2. Месторождения II класса:

$$\alpha_y = \begin{cases} 45^\circ - 55^\circ, & \text{лежащее крыло;} \\ 50^\circ - 70^\circ, & \text{висячее крыло, в зависимости от состояния горных} \\ & \text{парод массива;} \end{cases}$$

$$\alpha_6 = \begin{cases} 40^\circ - 45^\circ, & \text{лежащее крыло;} \\ 50^\circ - 60^\circ, & \text{висячее крыло.} \end{cases}$$

Смоделирована деформация уступов в результате взрывных работ на основе уравнения разрушения массива:

$$\tau_f = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

где  $\tau_f$  – предельное касательное напряжение разрушения,  $c$  – сцепление,  $\sigma_n$  – нормальное напряжение,  $\varphi$  – угол внутреннего трения.

Приведено уравнение распространения упругих волн в среде, для учета волновых процессов, вызванных взрывами:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где  $u$  – смещение частиц массива,  $v$  – скорость распространения волны,  $x$  – пространственная координата,  $t$  – время.

Тензор напряжений учитывающий взаимодействие напряжений в массиве:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений,  $\lambda, \mu$  – коэффициенты Ламе,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера,  $\varepsilon_{kk}, \varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора.

Формула для определения угла наклона борта  $\alpha_6^t$  на его предельной технологически достижимой границе:

$$\operatorname{tg} \alpha_6^t = \frac{H_6}{H_6 \cot \alpha_y + \frac{H_6}{3}(n-1) + H_6 B}, \quad (6)$$

где  $H_6$  – общая высота борта,  $\alpha_y$  – угол откоса уступа,  $B$  – ширина транспортных берм,  $n$  – число уступов, определяемое как  $n = \frac{H_6}{H_y}$ .

Проведена адаптация построения математической модели месторождения к условиям разработки открытым способом представляющий собой ключевой этап оптимизации горных работ. Данный процесс включает корректировку исходных геомеханических, геологических и технологических параметров модели с учетом особенностей планируемых горных работ в карьера, таких как глубина, угол откоса бортов, структура массива горных пород и интенсивность БВР.

Для адаптации модели сплайнов локальной интерполяции третьего порядка к планированию горных работ учтены следующие аспекты:

1. Геомеханические параметры массива – прочностные характеристики горных пород, коэффициенты сцепления и внутреннего трения, показатели деформируемости и напряженно-деформированного состояния;

2. Геологические условия – изменчивость состава пород, степень трещиноватости горных пород, наличие тектонических нарушений и зон ослабления;

3. Гидрогеологические факторы – уровень подземных вод, фильтрационные свойства пород и возможное влияние водонасыщения на устойчивость откосов;

4. Технологические параметры – схема отработки месторождения, расположение рабочих уступов, маршруты транспортировки и параметры буровзрывных работ.

**Во второй главе** диссертации «**Разработка создания выпуклой борта карьера на базе кубических сплайнов**» данной работы исследуется разработка методики построения выпуклой формы борта карьера, с использованием моделей сплайнов локальной интерполяции третьего порядка. В процессе ведения открытых горных работ обеспечение устойчивости бортов карьера является одной из ключевых задач, влияющих на безопасность горных выработок и эффективность вскрышных и добычных работ. Одним из методов формирования оптимальной траектории борта карьера является использование моделей сплайнов локальной интерполяции третьего порядка, обеспечивающей построение гладкой криволинейной геометрии уступов и откосов. При проектировании траектории борта карьера особое внимание уделяется углу наклона борта, поскольку этот параметр существенно влияет на устойчивость откосов, объемы избыточной выемки пород и безопасность ведения горных работ. Для определения оптимальной формы борта карьера использован метод сплайнов локальной интерполяции третьего порядка, позволяющий построить гладкую кривую, аппроксимирующую естественные формы рельефа уступов и откосов. Данный метод широко применяется в горном деле при геометрическом моделировании рельефа выемочно-транспортных схем карьера, а также при прогнозировании устойчивости массивов горных пород. На практике во многих случаях (требуется непрерывность самой функции и, по крайней мере, её производной первого порядка) часто используются модели локальных интерполяционных сплайнов  $S_3(x)$  третьей степени. Поскольку только модели локальных интерполяционных сплайнов третьей степени  $S_3(x)$  обладают теоретически обоснованным свойством экстремума (только функция локального интерполяционного сплайна третьей степени дает минимальное значение интеграла, взятого из квадрата второй производной функции  $f(x)$ ), практические вопросы имеют большое значение в процессах моделирования из-за высокой скорости сходимости.

При этом величина  $m_i = S_3(x_i)$ , называется наклоном сплайна в точке  $x_i$ . Здесь  $m_i$  определяется по формулам:

$$m_i = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2h}, i = 1, 2, \dots, N - 1, \quad (7)$$

$$m_0 = \frac{4f_1 - f_2 - 3f_0}{2h}, \quad m_N = \frac{3f_N - f_{N-2} - 3f_{N-1}}{2h}. \quad (8)$$

Данные формулы являются формулами численного дифференцирования второго порядка точности относительно шага  $h = \frac{b-a}{N}$ .

Пусть общая форма модели локального интерполяционного сплайна третьего порядка  $S_{3i}(x)$  для номера  $i$ , где  $i = \overline{0, 4}$ , будет следующей:

$$S_{3i}(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3. \quad (9)$$

При построении модели локального интерполяционного сплайна третьего порядка  $S_3(x)$  мы используем экспериментальные данные, полученные экспертами (табл. 1), для определения выпуклой формы борта.

Таблица 1

$i$	0	1	2	3	4
$x$	0	4	8	12	16
$y$	0	9	14	18	20

Результаты эксперимента полученной зависимости функции  $y = f(x)$  от переменной  $x$  ( $i$  – номер точек,  $x$  – значения переменной,  $y$  – значения функции).

Для определения выпуклой формы борта карьера мы используем экспериментальные данные, полученные экспертами (табл. 1), для построения следующей системы уравнений на основе интерполяции и граничных условий сплайновой модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = 0, \quad a_1 = 9, \quad a_2 = 14, \\ a_3 = 18, \quad c_0 = 0, \quad 4b_0 + 64d_0 = 9 \\ 4b_1 + 16c_1 + 64d_1 = 5 \\ b_2 + 4c_2 + 16d_2 = 1 \\ 2b_3 + 8c_3 + 32d_3 = 1 \\ b_0 - b_1 + 48d_0 = 0 \\ -c_1 + 12d_0 = 0 \\ b_1 - b_2 + 8c_1 + 48d_1 = 0 \\ c_1 - c_2 + 12d_1 = 0 \\ b_2 - b_3 + 8c_2 + 48d_2 = 0 \\ c_2 - c_3 + 12d_2 = 0 \\ c_3 + 12d_3 = 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

Для краткости эту систему запишем в матричном виде, как  $AX = B$ , где  $A$  – матрица составленная из коэффициентов неизвестных,  $X$  – матрица-столбец неизвестных,  $B$  – матрица-столбец свободных чисел.

Далее находится соответствующая обратная матрица. Для этой цели используется программа Microsoft Excel. Определяем обратную матрицу  $A^{-1}$ . Так как уравнение  $AX = B$  имеет решение  $X = B \cdot A^{-1}$ , то используя программу из Excel находим произведение  $B \cdot A^{-1}$ . Теперь находим неизвестных коэффициентов  $a_i, b_i, c_i, d_i$  ( $i = \overline{0, 3}$ ), которые приведены в таблице 2.

Таблица 2

$i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$
0	0	2,508929	0	-0,01618
1	9	1,732143	-0,1942	0,018415
2	14	1,0625	0,026786	-0,0106
3	18	0,767857	-0,10045	0,008371

Значения неизвестных коэффициентов для подходящих локальных кубических сплайнов.

Подставляя неизвестные коэффициенты в кубические многочлены, соответственно, получим кубические сплайны, которые интерполируют искомую функцию в заданных частичных отрезках. В итоге построенный график кубического сплайна приведен на рис. 1.

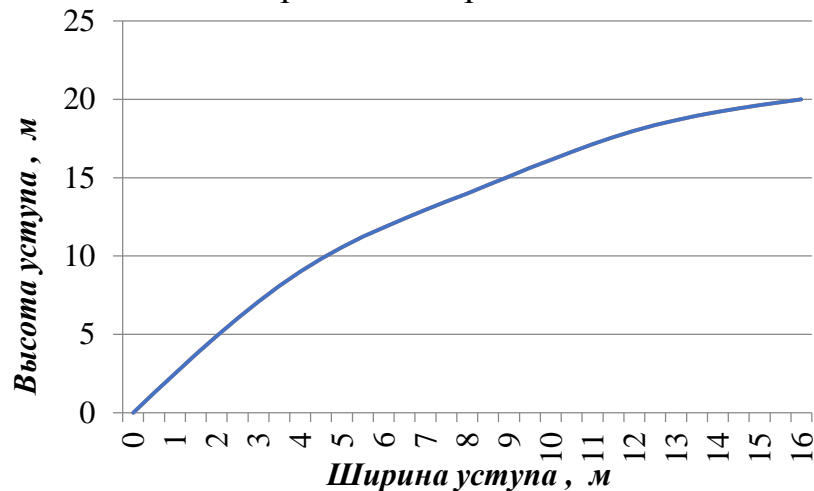


Рис. 1. Траектория борта карьера, полученная на основе кубического сплайна

Далее, используя формулы (7) и (8), находим значения наклонов в соответствующих точках, которые, по сути, являются значениями определения угла наклона для функции  $y'_i = S'_i(x_i)$ , где  $i = \overline{0; 3}$ :

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = m_0 = \frac{4y_1 - y_2 - 3y_0}{2h} = \frac{11}{4}, \operatorname{tg} \alpha_1 = m_1 = \frac{y_2 - y_0}{2h} = \frac{7}{4},$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = m_2 = \frac{y_3 - y_1}{2h} = \frac{9}{8}, \operatorname{tg} \alpha_3 = m_3 = \frac{y_4 - y_2}{2h} = \frac{3}{4}.$$

Для определения угла наклона в градусах, используем функцию арктангенс. Тогда

$$\alpha_0 = 70^\circ, \alpha_1 = 60^\circ, \alpha_2 = 48^\circ \text{ и } \alpha_3 = 37^\circ.$$

Оптимально подобранные углы наклона борта обеспечивают его устойчивость за счёт постепенного увеличения наклона от подошвы борта к его вершине. Экспериментальные расчёты, направленные на моделирование формы борта карьера с использованием метода кубического сплайна. В ходе исследования были определены:

- углы наклона криволинейной траектории борта в градусах;
- тангенсы углов наклона в каждой контрольной точке;
- графическая зависимость полученных данных, отображающая динамику изменения углов наклона уступов в зависимости от высоты борта.

Разработка оптимальной выпуклой формы траектории борта карьера, обеспечивающей повышенную устойчивость откосов, снижение объемов вскрышных работ и повышение безопасности ведения горных работ.

Решение поставленной задачи осуществлена следующим образом. Для последующих экспериментов приводятся только итоговые результаты, полученные на основе аналогичных расчетов, как в §1.3. Такой подход позволяет избежать дублирования вычислительных процедур и сосредоточиться на анализе данных, сравнении результатов и обосновании оптимальной формы траектории борта карьера.

Определить траекторию борта карьера, если в результате экспериментов, получена некоторая зависимость функции  $y = f(x)$  от переменной  $x$ , (табл. 3).

Таблица 3

$i$	0	1	2	3	4
$x$	0	4	8	12	16
$y$	0	10	16	21	24

Результаты эксперимента полученной зависимости функции  $y = f(x)$  от переменной  $x$  ( $i$  – номер точек,  $x$  – значения переменной,  $y$  – значения функции).

Ниже, приводим полученные результаты (таблица 4):

Таблица 4

$i$	0	1	2	3
$tg\alpha_i = m_i$	3	2	1,3	1
$\alpha_i$	$71,57^\circ$	$63,44^\circ$	$53,97^\circ$	$45^\circ$

В первой строке приведены порядковые номера, во второй – значения тангенса угла наклона, а в третьей – значения углов в градусах.

Теперь, на основании вышеопределенных данных, построим траекторию борта карьера (рис.2).

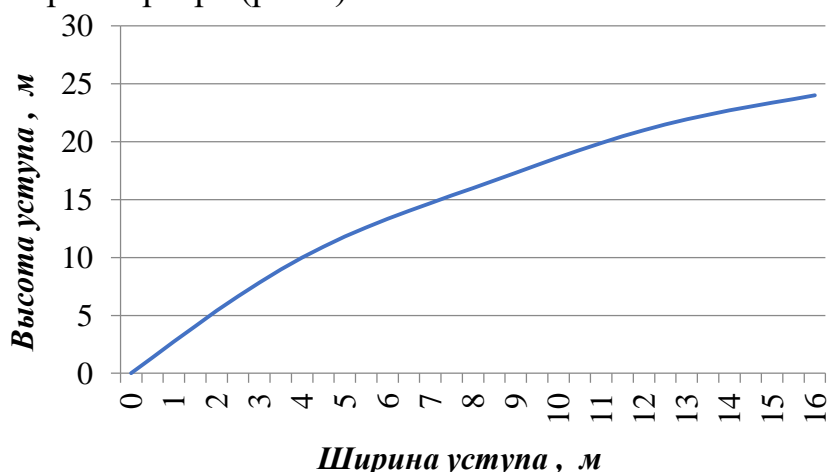


Рис. 2. Траектория борта карьера, полученная с использованием кубического сплайна

Аналогичным образом результаты, полученные во 2-м, 3-м, 4-м и 5-м экспериментальных интервалах при определении траектории борта карьера, приведены в диссертации. Далее рассмотрена задача, сравнительного анализа методов формирования выпуклой формы борта карьера, с целью обеспечения его устойчивости и повышения безопасности ведения горных работ. Одним

из методов, используемых для данной задачи, является метод кубических сплайнов, позволяющего аппроксимировать траекторию борта карьера путем построения непрерывной кривой, которая отвечает требованиям геометрической и физической модели устойчивости. Пусть, кубическая сплайн-функция дана в виде (9). Ниже приведены примеры для определения вида кубической сплайн-функции в частных отрезках при различных ширины и высоты борта карьера (уступа).

1. Борт карьера (уступа) шириной 16 м и высотой 24 м задан как функциональная зависимость (табл. 3).

Частичные кубические сплайн-функции получают в виде:

$$\begin{aligned} y_0 &= S_0 = -0,02x^3 + 2,76x; \\ y_1 &= S_1 = 0,02x^3 - 0,42x^2 + 4,75x - 2,21; \\ y_2 &= S_2 = -0,01x^3 + 0,28x^2 - 0,29x + 12,64; \\ y_3 &= S_3 = 0,01x^3 - 0,4x^2 - 7,04x - 20,14. \end{aligned}$$

Таким же образом получены результаты для бортов карьеров 2-5.

Сравнивая полученные результаты, в пяти примерах, с различными ширинами и высотами борта карьера, можно сделать вывод, что в зависимости от ширины и высоты, траектория борта карьера будет более или менее выпуклым. В табл. 5 приведены значения тангенса угла наклонов в соответствующих точках, а в табл. 6 – значения угла наклонов в градусах в соответствующих точках.

Таблица 5

Отрезки $tga_i$	[16; 20]	[16; 24]	[16; 28]	[20; 24]	[20; 28]
$tga_0$	2,75	3	2,875	2,8	2,6
$tga_1$	1,75	2	2,125	1,6	1,8
$tga_2$	1,125	1,3	1,625	1	1,3
$tga_3$	0,75	1	1,375	0,8	1

Таблица 6

Отрезки $\alpha_i$	[16; 20]	[16; 24]	[16; 28]	[20; 24]	[20; 28]
$\alpha_0$	70°	71,57°	70,82°	70,35°	69°
$\alpha_1$	60,26°	63,44°	64,8°	58°	61°
$\alpha_2$	48,36°	53,97°	58,39°	45°	52,44°
$\alpha_3$	37°	45°	53,95°	38,66°	45°

Модель наименьших квадратов в общем случае на основе экспериментальных данных

$$\delta(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{i=1}^n [a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 + \dots + a_nx_i^n - y_i]^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

для корреляционного анализа выпуклой формы борта карьера. В частности, на основе корреляционного анализа аппроксимации с квадратной функцией  $y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$ ,  $a_0, a_1, a_2$  – ? оценены выпуклые формы бортов карьеров.

**В третьей главе** диссертации «**Математическое моделирование процессов определения координат центра тяжести массива горных пород при эксплуатации карьера**» разработана математическая модель и определена координаты центра тяжести горного массива при эксплуатации карьера. Для обеспечения устойчивости необходимо комплексное понимание распределения масс в пределах потенциально нестабильного участка массива. В этой связи особую актуальность приобретает задача определения координат центра тяжести масс горного массива, ограниченного геометрией борта карьера и плоскостью возможного скольжения. Знание положения центра тяжести масс позволяет моделировать действующие силы, анализировать равновесие и рассчитывать коэффициент запаса устойчивости.

Определение координат центра тяжести масс и представление массива в виде материальной точки позволяют применять методы механики для анализа устойчивости откосов борта карьера или уступа. В настоящем исследовании предлагается моделировать горный массив как систему материальных точек, разбиение которой позволяет определить координаты центра масс каждой из составляющих частей. Затем, применяя известную формулу взвешенного суммирования, находят координаты центра масс всего массива. При этом учитывается возможность переменной плотности горных пород, т.е. плотность  $\gamma = \gamma(x, y)$  может изменяться в пределах рассматриваемой области. Расчёты производятся в пределах заданного контура, ограниченного бортом карьера и плоскостью возможного скольжения, который аппроксимируется с использованием метода кубического сплайна.

При вычислении координат центра тяжести масс плоской фигуры с переменной плотностью  $\gamma = \gamma(x, y)$  используются положения механики сплошных сред и методы интегрального исчисления. В частности, координаты центра тяжести масс области  $D$  определяются как:

$$x_c = \frac{\iint_D x\gamma(x,y)dxdy}{\iint_D \gamma(x,y)dxdy}, \quad y_c = \frac{\iint_D y\gamma(x,y)dxdy}{\iint_D \gamma(x,y)dxdy}, \quad (12)$$

где  $D$  – область интегрирования, определяющая плоскую фигуру.

Верхняя граница плоской области горного массива является выпуклая кривая, определенная на основе модели локального интерполяционного сплайна третьего порядка. Во избежание повторяемости, построения верхней границы горного уступа, ограниченного бортом карьера, используем результаты, полученные в §2.1. Геометрически объект представлен в виде плоской области с длиной основания 20 условных единиц и высотой 16 условных единиц. Координаты центра тяжести масс каждой частной области  $O_i$  рассчитываются по формулам (12). Следующим шагом является формализация границ интегрирования, обозначенных как  $D_i$ ,  $i = \overline{1, 4}$ . Для каждого частичного отрезка  $x \in (x_i; x_{i+1})$  соответствующая область  $D_i$  ограничивается сверху функцией  $S_{3i}(x)$ , заданной на основе локального интерполяционного сплайна третьего порядка, снизу – прямой, проходящей через точки  $(x_i; 0)$  и  $(x_{i+1}; 0)$ , а также вертикальными линиями  $x = x_i$  и  $x = x_{i+1}$ , которые формируют левую и правую границы, соответственно. Геометрическое изображение описанной

конфигурации представлено на рис.3.

В результате получены следующие координаты центра тяжести масс  $O_i$  частей горного массива, на которых он разделен:

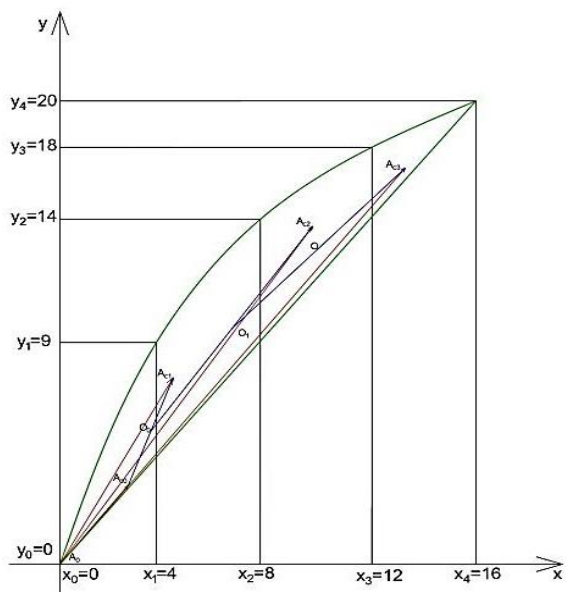
$$(x_{c0} = 2,634; y_{c0} = 3,432), (x_{c1} = 6,548; y_{c1} = 6,197), \\ (x_{c2} = 10,027; y_{c2} = 15,047), (x_{c3} = 14,017; y_{c3} = 19,308).$$

окончательный результат будет равен

$$x_c = 8; y_c = 13,25.$$

Тогда искомый центр тяжести масс горного массива, ограниченного областью  $D$ , будет равен

$$O(x_c, y_c) = O(8; 13,25).$$



**Рис. 3. Нахождения координат центра тяжести масс горного массива**

Используя точку  $O(x_c, y_c)$ , как центр тяжести масс горного массива, можно определить действующие на нее силы, т.е. удерживающих и сдвигающих сил. Отношение этих сил даёт коэффициент запаса устойчивости для уступа. Рассмотренный метод позволяет определить коэффициент запаса устойчивости более простым способом, что облегчает решение данной задачи специалистам по горному делу.

Коэффициент запаса устойчивости определяется как отношение удерживающих породу сил к сдвигающим её силам, т.е.:

$$K = \frac{|\bar{K}_{уд}|}{|\bar{K}_{сд}|}, \quad (13)$$

где  $\bar{K}_{уд}$  – вектор удерживающих сил,  $\bar{K}_{сд}$  – вектор сдвигающих сил.

Поскольку удерживающие и сдвигающие породу силы могут быть представлены в виде вектор, то каждую из них целесообразно записать в виде суммы компонент по осям координат.

Скорость изменения векторов  $\bar{K}_{уд}$  и  $\bar{K}_{сд}$  определяются в точке  $M_c(x_c; y_c)$ , которая является координаты центром тяжести масс горной породы, как градиент этих векторов. В результате получим численные значения удерживающих  $\bar{K}_{уд}$  и сдвигающих  $\bar{K}_{сд}$  сил.

Тогда отношения этих сил является величиной коэффициента запаса устойчивости. В этом случае формула определения коэффициента запаса устойчивости представляется в виде:

$$K = \frac{|\bar{K}_{уд}|}{|\bar{K}_{сд}|} = \frac{grad \bar{K}_{уд}(M_c) + tg(\varphi - \beta)}{grad \bar{K}_{сд}(M_c) + tg\beta}. \quad (14)$$

Таким образом, по формуле (13) можно будет определить коэффициент запаса устойчивости горной породы, где  $M_c(x_c; y_c)$  координаты центра масс этого грунта,  $grad \bar{K}_{уд}(M_c)$  и  $grad \bar{K}_{сд}(M_c)$  скорость изменения. В результате

получим численное значение выражение  $K = \frac{|\bar{K}_{уд}|}{|\bar{K}_{сд}|}$ , что делает удобным его вычисления. Координаты центра масс  $M_c(x_c; y_c)$  иллюстрированы на рисунке 6.

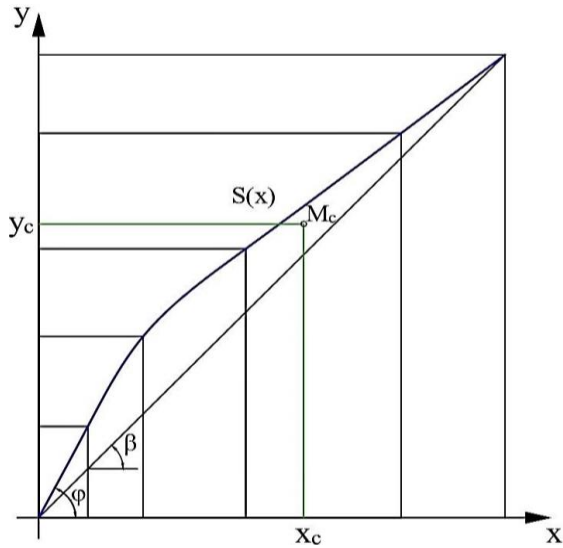


Рис. 4.  $S(x)$  – кривая, определяющая контур борта карьера,  $\beta$  – угол образованный между осью  $Ox$  и наклонной линией,  $\varphi$  – угол между осью  $Ox$  и касательной к кривой  $S(x)$ .

Оценка (КЗУ) осуществляется как отношение суммарных удерживающих сил к сдвигающим силам. Удерживающие силы описываются тангенсами углов наклона касательных к сплайн-кривой в точках  $x_i$ , где  $i = \overline{1, n-1}$ .

Сдвигающие силы определяются через углы  $\varphi_i - \beta$ , где  $\beta$  – угол наклона линии скольжения горного массива, а также через величину  $tg\beta$ , учитывающую воздействие возможного проскальзывания.

Оценим КЗУ борта карьера  $K$ , рассматривая его как отношение суммы тангенсов углов  $\varphi_i$ , образованных между касательными к кривой, описывающей траекторию борта, в точках  $x_i$ , где  $i = \overline{1, n-1}$ , к сумме величин  $tg(\varphi_i - \beta) + tg\beta$ , где  $\beta$  – угол наклона плоскости потенциального скольжения горной породы. В данном случае тангенсы углов  $\varphi_i$  интерпретируются как компоненты удерживающих сил, в то время как выражения  $tg(\varphi_i - \beta) + tg\beta$  характеризуют сдвигающие силы, действующие в массиве горных пород.

Если принимать

$$K_{уд} = tg\varphi_1 + tg\varphi_2 + tg\varphi_3 + \dots + tg\varphi_{n-1} \text{ и}$$

$$K_{сд} = tg(\varphi_1 - \beta) + tg(\varphi_2 - \beta) + tg(\varphi_3 - \beta) + \dots + tg(\varphi_{n-1} - \beta) + tg\beta,$$

то получим следующее:

$$K = \frac{|\bar{K}_{уд}|}{|\bar{K}_{сд}|} = \frac{tg\varphi_1 + tg\varphi_2 + tg\varphi_3 + \dots + tg\varphi_{n-1}}{tg(\varphi_1 - \beta) + tg(\varphi_2 - \beta) + tg(\varphi_3 - \beta) + \dots + tg(\varphi_{n-1} - \beta) + tg\beta}. \quad (15)$$

Для устойчивости борта карьера требуется выполнение условия  $K > 1$ . Выполнение этого условия обеспечивается если имеет место следующие:

1)  $\varphi_1 > \varphi_2 > \dots > \varphi_{n-1}$ , т.е. углы  $\varphi_i$ , где  $i = \overline{1, n-1}$ , образуют убывающую последовательность от подошвы до вершины карьера;

2)  $\varphi_{n-1} > \beta$ , т.е. наименьшее из углов  $\varphi_{n-1}$  всегда будет больше чем  $\beta$  – угла наклона скольжения горного массива.

Таким образом, здесь доказана следующая теорема.

**Теорема.** Если траекторией борта карьера является выпуклой гладкой кривой  $y = S(x)$ , полученной в виде кубического сплайна, то при выполнении условий:

1)  $\varphi_1 > \varphi_2 > \dots > \varphi_{n-1}$ , т.е. углы  $\varphi_i$ , где  $i = \overline{1, n-1}$ , образуют убывающую последовательность;

2)  $\varphi_{n-1} > \beta$ , т.е. наименьшее из углов  $\varphi_{n-1}$  всегда будет больше, чем  $\beta$  – угла

наклона скольжения горного массива,  $\varphi_i$  – углы образованные между касательными к кривой в точках  $x_i$  и осью  $Ox$ , то борт карьера устойчив и коэффициент запаса устойчивости  $K > 1$ .

Оценки, проведённые в различных условиях, показали, что коэффициент запаса, необходимый для обеспечения устойчивости бортов, в зависимости от степени достоверности исходных данных и их категорий обычно варьируется в пределах 1,1–1,5.

Оценки устойчивости горного массива, подлежащего выемке, на основе расчёта его геометрических и механических характеристик предусматривает нахождение тангенса угла наклона и тангенса угла трения центра тяжести. Эти величины определяются следующим образом:

1) Тангенс угла наклона, точнее, тангенс угла образованного между линией скольжения горного массива с осью абсцисс, находим как отношение величин высоты  $y_4$  к ширине  $x_4$ , т.е.  $tg\beta = \frac{y_4}{x_4}$ .

2) Тангенс угла трения центра тяжести, точнее, тангенс угла образованного между отрезком, соединяющего начало координат и центр масс с осью абсцисс, находим как отношение координаты точки  $M_C(x_c; y_c)$ , т.е.  $tg\varphi = \frac{y_c}{x_c}$ .

Далее, находим тангенс угла трения центра тяжести к тангенсу угла наклона к линии скольжения, обозначив эту величину через  $K = \frac{tg\varphi}{tg\beta}$ .

Рассматривается горный массив с шириной 16 м и высотой 20 м. Нахождение координаты центра тяжести горного массива, ограниченного между кривой, описывающей кубическим сплайном и линией скольжения, а также коэффициент запаса устойчивости.

Производят следующим образом. Обозначив через  $A_0(0; 0)$ ,  $A_1(4; 9)$ ,  $A_2(8; 14)$ ,  $A_3(12; 18)$  и  $A_4(16; 20)$  точки с координатами, расположенные по кривой, служащей траекторией горного массива  $(x_i; y_i)$ , где  $i = \overline{0; 4}$ .

Получаем окончательный результат координаты центра тяжести  $M_C(x_c; y_c)$ :  $M_C = \frac{M_{C11} + M_{C12}}{2} = (8; 13,25)$ . Далее вычисления тангенс угла наклона и тангенс угла трения центра тяжести:  $tg\beta = \frac{10}{8} = 1,25$ ,  $tg\varphi = \frac{13,25}{8} = 1,656$ . Отношение тангенса угла наклона к тангенсу угла трения центра тяжести:  $K_1 = \frac{tg\varphi}{tg\beta} = \frac{1,656}{1,25} \approx 1,325 > 1$ . Позволяет оценить устойчивость. Т.к.  $K_1 > 1$ , то можно считать, что горный массив является устойчивым. Проведя таким же образом вычисления для примеров 2-5, получим результаты, приведенные в таблице 7:

Таблица 7

$i$ - случаи	Ширина и высота	$K_i$ - КЗУ
1	16 и 20 м	$K_1 = 1,33$
2	16 и 24 м	$K_2 = 1,27$
3	16 и 28 м	$K_3 = 1,17$
4	20 и 24 м	$K_4 = 1,29$
5	20 и 28 м	$K_5 = 1,23$

**Первый столбец – номера случаев, второй столбец – ширина и высота горного массива, третий столбец – показатель УЗК борта карьера.**

Сопоставляя полученные результаты, имеем что борт карьера более устойчив при  $K_1 = 1,33$  и менее устойчив при  $K_3 = 1,17$ .

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основе диссертационных исследований на соискание степени доктора философии (PhD) по техническим наукам по теме «Математическое моделирование процессов работ на карьере: анализ основных параметров, оптимизация и прогнозирование» получены следующие выводы и рекомендации имеющие теоретическую и практическую значимость:

1. Применены современные методы математического моделирования и численные расчеты являющейся неотъемлемой частью эффективного и безопасного планирования и эксплуатации карьеров.

2. Проведены исследования по применению метода на основе локального интерполяционного сплайна третьего порядка для построения выпуклой формы траектории борта карьера.

3. Создана кубическая сплайн-функция, в виде кривой, интерполирующая данную функцию с заданными значениями переменной и функции в табличном виде.

4. Разработана и обоснована математическая модель определения координат центра тяжести масс горного массива.

5. Предложен метод, включающий построение локальной интерполяционной сплайн-модели третьей степени, получение на её основе гладкой выпуклой траектории борта карьера, а также последующее определение коэффициента запаса устойчивости по критерию положения центра масс горного массива, и доказана соответствующая теорема.

Предложена методика построения гладкой выпуклой траектории борта карьера с использованием локального интерполяционного сплайна третьего порядка и с последующим определением коэффициента запаса устойчивости по критерию положения центра масс и доказана теорема.

6. Проведен расчёт коэффициента запаса устойчивости борта карьера для различных геометрических конфигураций (вариации ширины и высоты) с последующим сравнительным анализом.

7. Вычислены координаты результирующего центра масс сложной геометрической фигуры, представляющей собой горный массив, подлежащий выемке, с использованием аппарата математического анализа и теоремы сложения векторов.

8. Разработан комплексный метод прогноза устойчивости борта карьера в сложных горно-геологических условиях на базе широкого использования математических методов.

**THE ONE-TIME SCIENTIFIC COUNCIL BASED ON THE SCIENTIFIC  
COUNCIL FOR THE AWARD OF ACADEMIC DEGREES  
NO.PHD03/2025.27.12.T.02.07 UNDER THE TASHKENT STATE  
TECHNICAL UNIVERSITY NAMED AFTER ISLAM KARIMOV**

---

**NAVOI STATE UNIVERSITY**

**NOROV GULOMJON MIRZOGOLIB UGLI**

**MATHEMATICAL MODELING OF OPEN-PIT OPERATION  
PROCESSES: ANALYSIS, OPTIMIZATION, AND PREDICTION OF KEY  
PARAMETERS**

**04.00.17 – Physical processes in mining;  
05.01.07 – Mathematical modeling. Numerical methods and software packages**

**ABSTRACT  
OF THE DISSERTATION DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) IN  
TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent – 2026**

The topic of the dissertation of the Doctor of Philosophy (PhD) is registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan under No. B2024.4.PhD/T5059.

The dissertation has been carried out at Navoi State University.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is posted on the website of the Scientific Council [www.tdu.uz](http://www.tdu.uz) and the Information and Educational portal "ZiyoNet" ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Scientific supervisors:**

**Nasirov Utkir Fatidinovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor

**Khudayberdiev Oybek Jumaboevich**  
Doctor of Philosophy (PhD) in Physics and Mathematics  
Sciences, Associate Professor

**Official opponents:**

**Kazakov Aziz Nigmanovich**  
Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences,  
Associate Professor

**Bakhromov Sayfiddin Akbarovich**  
Doctor of Technical Sciences (DSc), Associate Professor

**Leading organization:**

**University of Geological Sciences**

The defense of the dissertation will take place on «24» 04 2026 at 14<sup>30</sup> o'clock at a meeting of Scientific council PhD.03/2025.27.12.T.02.07 at Tashkent State technical university named after Islam Karimov (Address: 100095, Tashkent, University street, 2. Tel./fax: (+99871) 207-44-40/(+99871) 207-14-64, e-mail: [tadqiqotchi@tdtu.uz](mailto:tadqiqotchi@tdtu.uz)).

The dissertation is registered in Information-resource center (IRC) of Tashkent State technical university (registration number № 97). Address: 100095, Tashkent, University street, 2. Phone: (+99871) 207-44-40, fax: (+99871) 207-14-64.

The abstract of the dissertation was sent out on «09» 04 2026 year.  
(register of the dispatch protocol № \_\_\_ on «09» 04 2026 year).



**J.B. Toshov**  
Member of the one-time Scientific council for  
awarding of the Scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor

**T.O. Komilov**  
Scientific secretary of the one-time Scientific  
council awarding scientific degrees, PhD, associate professor

**S.S. Sayyidqosimov**  
Chairman of the Scientific Seminar under the One-time  
Scientific Council for the Award of Academic Degrees  
Doctor of Technical Sciences, Professor

## **INTRODUCTION (abstract of the dissertation of Doctor of Philosophy (PhD))**

**The aim of the study** is to develop methods for constructing the convex shape of the quarry side based on mathematical modeling based on spline functions and to predict the stability of the quarry side based on the analysis of the center of gravity of the rock mass and the stability reserve coefficient.

**The object of the study** is a mountain range and the slopes of the quarry sides, exposed to the influence of geological and technical factors in the process of open-pit mining of minerals.

**The scientific novelty of the study is as follows:**

the construction of local interpolation spline models of the third level and, based on this model, the construction of a convex trajectory of the side, which serves to ensure the optimal geometry of the slopes of the quarry, safe mining operations for complex geological and hydrogeological conditions;

based on a mathematical model for determining the trajectory of the quarry side, built on the basis of a cubic spline, and the coordinates of the center of the rock mass bounded by the displacement line, an increase in the accuracy of the engineering assessment of the stability coefficient and the stability of the slope is substantiated;

the theorem on the existence of a correlation between the convexity of the quarry side trajectory and the stability reserve coefficient has been proven;

a complex of methods for assessing the stability reserve coefficients corresponding to various geometric configurations of the quarry side for specific mining and geological conditions has been developed, and an algorithm and a set of programs for determining the optimal parameters of the slopes of the side and their application in design practice have been developed.

**Implementation of the research results.** Based on the conducted research on the development of mathematical models of slope stability, optimization of quarry wall geometry and effective engineering solutions to improve mining safety:

The method of constructing a convex trajectory of the quarry side using cubic splines has been implemented at the Yoshlik-1 quarry of Almylyk Mining and Metallurgical Plant JSC (certificate of Almylyk Mining and Metallurgical Plant JSC №SL-875 dated October 16, 2025). As a result, it was possible to increase the slope stability factor by 15%, reduce slope strengthening costs by 12%, and increase the volume of mineral extraction by 8% due to optimization of the side geometry and reduction of the area of safe slopes;

The methodology for determining the coordinates of the center of mass of a rock mass and calculating the slope stability factor has been implemented at the Yoshlik-1 quarry of Almylyk Mining and Metallurgical Plant JSC (certificate of Almylyk Mining and Metallurgical Plant JSC №SL-875 dated October 16, 2025). As a result, the accuracy of slope stability assessment was increased by 18%, accident risks were reduced by 20%, and optimization of design solutions made it possible to reduce slope strengthening costs by 10%, which contributed to increased mining productivity and reduced operating costs.

**Structure and volume of the dissertation.** The structure of the dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references and appendices. The volume of the dissertation is 119 pages.

**E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I bo'lim (I часть; part I)**

1. Norov G.M., Khudayberdiev O.J., Rakhmatov S.Kh., Mekhmonov M.R. Determination of convex shape of the trajectory of the quarry board trajectory by the method of cubic splines. // The American Journal of Interdisciplinary Innovations and Research. – USA: November 2023, Volume 05, Issue 11, Pages: 51-62. (SJIF Impact Factor (2024): 8.83).

2. Худайбердиев О.Ж., Эркинова М.Э. Норов Г.М. Определение аналитического выражения траектории борта карьеры. // Journal Of International Scientific Research. Volume 1, Issue 3, November, 2024, Pages 302-308. Online ISSN: 3030-3508. (ResearchBib Impact Factor (2024): 8.718).

3. Norov G.M., Khudayberdiev O.J., Rakhmatov S.Kh., Mekhmonov M.R. Assessment of the stability of the pit wall using the cubic spline method and the slope angle of the pit wall trajectory. // EPRA International Journal of Research and Development (IJRD). – USA: August 2023, Volume: 8, Issue: 8. Pages: 75-80. (SJIF Impact Factor (2023): 8.574).

4. Норов Г.М., Худайбердиев О.Ж. Определение координат центра масс горного массива ограниченного бортом карьеры и плоскостью скольжения. // «Вестник НУУз» научный журнал Национального Университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека. – Ташкент: 2024, №2, – С. 124-130 (01.01.01 №8).

5. Худайбердиев О.Ж., Рахматов С.Х., Норов Г.М., Карабекян С.Х. Задача об определении формы отвалов, методах вычисления их объёмов и массы. // Горный вестник Узбекистана. – Навои: 2023, №4, – С. 69-71 (05.00.00; №7).

6. Насиров У.Ф., Худайбердиев О.Ж., Норов Г.М. Определение коэффициента запаса устойчивости центра тяжести горного массива. Научно-теоретический журнал // Научный вестник Бухарского государственного университета. – Бухара: 2025, №6, – С. 96-101 (01.01.01; №3).

7. Norov G.M. Karyer bortlarining qavariq shaklini aniqlashda korrelyatsion tahlilning matematik modeli // Sanoatda raqamli texnologiyalar ilmiy-texnik jurnali. (E) ISSN: 3030-3214, Volume 4, №1, 2026, DOI: 10.70769/3030-3214.SRT.4.1.2026.17 (04.00.00; 05.00.00).

8. Norov G.M. Konchilik ishlarida karyer bortlarining turg'unligini baholashdagi sonli usullarning tahlili // Development of science ilmiy jurnal. (E) ISSN: 3030-3907, Volume 2, mart 2026/3, DOI: <https://devos.uz/article.php?id=4126> (04.00.00; 05.00.00).

9. Norov G.M., Xudayberdiyev O.J., Jumaboyev E.O. Karyer bortining qavariq shakldagi trayektoriyasini kubik splayn usuli yordamida aniqlash uchun dasturiy ta'minot. O'zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi, Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risidagi Guvohnoma DGU 36823, 24.04.2024 y.

10. Norov G‘.M., Xudayberdiyev O.J., Raxmatov S.X. Karyer bortining turg‘unligini kubik splayn funktsiyasi va og‘ish burchagining tangensi yordamida baholash usuli uchun dasturiy ta‘minot. O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi, Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risidagi Guvohnoma DGU 29708, 23.11.2023 y.

## **II bo‘lim (II часть; part II)**

11. Norov G‘.M., Xudayberdiyev O.J., Raxmatov S.X., Mexmonov M.R. Построение выпуклой формы траектории борта карьера методом кубических сплайнов. // Ali Qushchining 620 yillik tavalludiga bag‘ishlangan “Ali Qushchi – Mirzo Ulug‘bek ilmiy maktabining buyuk elchisi” mavzusidagi xalqaro ilmiy anjuman materiallari. – Samarqand: 21-22 sentyabr, 2023 y. – 146-152 b.

12. Xudayberdiyev O.J., Norov G‘.M., Mexmonov M.R. Об использовании координат центра масс горной породы для определения коэффициента запаса устойчивости борта карьера. // “Zarafshon vohasini kompleks innovatsion rivojlantirish yutuqlari, muammolari va istiqbollari” V xalqaro ilmiy-amaliy anjumani materiallari, 1-qism. – Navoiy: 18-19 aprel 2024 y. – 135-137 b.

13. Norov G‘.M. Integration and analytical results of concrete sciences with production (in the example of mathematics and production). // “Oliy ta‘limda raqamli texnologiyalar va innovatsiya: fan, ta‘lim, tarbiya” mavzusidagi xalqaro miqyosdagi ilmiy-texnik anjuman. – Navoiy: 18 aprel 2024 y. – 123-125 b.

14. Norov G‘.M. Samaradorlikka erishish uchun karyer bortining qavariq shakldagi trayektoriyasini aniqlashda interpolatsiya masalasining tadbiqu. // “Aniq va tabiiy fanlarni o‘qitishda zamonaviy yondashuvlar: muammo va yechimlar” mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari. II qism. – Navoiy: 18-19 aprel 2025 y. – 30-34 b.

15. Norov G‘.M. Karyerda portlatish natijasida kelib chiqadigan chang oqimini tahlil qilishning matematik modeli. // “Yashil” iqtisodiyot sharoitlarida innovatsion rivojlanishning zamonaviy yo‘nalishlari Respublika ilmiy-amaliy anjuman. – Navoiy: 13-14 may 2025 y. – 243-245 b.

16. Худайбердиев О.Ж., Норов Г.М. Определение коэффициента запаса устойчивости – как отношение тангенсов угла наклона к углу трения центра тяжести горного массива // Сборник материалов Республиканской научно-практической конференции с международным участием на тему: «Перспективы развития производства, науки и образования в области технологических металлов». – Алмалык: 2-3 июня 2025 г. – С. 333-335.

17. Abduazizov N.A., Xudayberdiyev O.J., Norov G‘.M., Karabekyan S.X. Математический расчёт и сравнительный анализ свойств жидкости гидроцилиндра при использовании уплотнителя. // “O‘zbekiston konchilik xabarnomasi” ilmiy-texnik va ishlab chiqarish jurnali. – Navoiy: №4(91) oktyabr-dekabr 2022 yil, 87-90 b. (05.00.00; №7).

18. Xudayberdiyev O.J., Norov G‘.M., Karabekyan S.X., Jumaboev E.O. Математическое моделирование процесса гололедообразования и вычисление массы льда на линиях электрических проводов. // “O‘zbekiston

konchilik xabarnomasi” ilmiy-texnik va ishlab chiqarish jurnali. – Navoiy: №2(85)  
aprel-iyun 2021 yil, 88-90 b. (05.00.00; №7).

Avtoreferat “TDTU TIB”da tahrirdan o‘tkazildi hamda o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi.

**Bosmaxona litsenziyasi:**



**9338**

Bichimi: 84x60 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. «Times New Roman» garniturası.  
Raqamli bosma usulda bosildi.  
Shartli bosma tabog‘i: 3,5. Adadi 100 dona. Buyurtma № 19/26.

Guvohnoma № 851684.  
«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.  
Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Alisher Navoiy ko‘chasi, 36 uy.  
Tel: +99894-600-44-07