



SANOATDA

RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR

Volume 4
№3
September, 2026

ILMIY-TEKNIK JURNAL

E-mail:
info@srt-journal.uz
Web-adress:
www.srt-journal.uz



**ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

научно-технический журнал

ISSN (ISSN-L): 3030-3214

**DIGITAL TECHNOLOGIES
IN INDUSTRY**

scientific and technical journal

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY TA’LIM, FAN VA
INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI
QARSHI DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

SANOATDA RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR
Ilmiy-texnik jurnali

**ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**
Научно-технический журнал

DIGITAL TECHNOLOGIES IN INDUSTRY
Scientific and technical journal

№4(3) / 2026

QARSHI – 2026

Ilmiy-texnik jurnal O'zbekiston
Respublikasi Prezidenti
Administratsiyasi huzuridagi Axborot
va ommaviy kommunikatsiyalar
agentligining 26.07.2023-yildagi
106679-son guvohnomasi.

Ta'sischilar

Qarshi davlat texnika universiteti,
"Olmaliq kon-metallurgiya kombinati"
AJ

CHIEF EDITOR

Sherzod Nematov

Rektor, Qarshi davlat texnika
universiteti

E-mail: rektor@kstu.uz

Bosh muharrir o'rinbosari

Abdurashid Khasanov

T.f.d. prof. Olmaliq kon-metallurgiya
kombinati

E-mail: abdurashidsoli@mail.ru

Mas'ul kotib

Abbas Shadieyev

T.f.d., Qarshi davlat texnika universiteti

E-mail: a.shodiyev@srt-journal.uz

Editorial address

180100, Qarshi shahri, Mustaqillik shoh
ko'chasi, 225-uy, Qarshi davlat texnika
universiteti

Tel: (+998) 90 673 64 33

E-mail: info@srt-journal.uz

Veb sayt: www.srt-journal.uz

Texnik muharrirlar

Najmiddin Boymurodov

Ilhom Togaev

Tahlil quruhi

Oybek Qayumov,

Uchqun Eshonqulov,

Dizayn

Farusxon Olimov

Jurnalning elektron versiyasini nashr

etish va yangilash uchun mas'ul

Abbos Shodiev

Chop etilgan

Terishga topshirilgan sana:

15.09.2026 y.

Nashr qilingan sana: 28.09.2026 y.

Format: 60×84 1/8. Times shriftida.

Shartli bosma taboq: 21,125. Bosma
taboq: 21,125. Adadi: 48 nusxa.

Buyurtma №: 036. Qarshi davlat texnika
universitetining "INTELLEKT" MIU
nashriyotida chop etildi.

Manzil: Qarshi, Mustaqillik ko'chasi,
225.

© Sanoatda raqamli texnologiyalar

(E)ISSN: 3030-3214

DOI: [10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026](https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026)

TAHRIRIYAT HAY'ATI

Sherzod Nematov, Rektor. Qarshi davlat texnika universiteti, O'zbekiston
Abdulla Xursanov, t.f.d., Olmaliq kon-metallurgiya kombinati, O'zbekiston
G'ulom Uzoqov, t.f.d., prof. Qarshi davlat texnika universiteti, O'zbekiston
Abdirashid Hasanov, t.f.d. prof. Olmaliq kon-metallurgiya kombinati,
O'zbekiston

Xayit Turayev, k.f.d., prof., Termiz davlat universiteti kimyo fakulteti dekani,
O'zbekiston

Eshmurat Pirmatov, t.f.d., prof. Yevroosiyo fanlar akademiyasi akademigi,
Qozog'iston

Bum Sung Kim, t.f.d., prof., Koreya nodir metallar instituti, Janubiy Koreya
Irina Shadrinova, t.f.d., prof. Rossiya fanlar akademiyasi M.V.Melnikov
nomidagi Mineral resurslardan kompleks foydalanish instituti, Rossiya

Gabor Mucsi, PhD, DSc, prof. Mishkols universiteti, Vengriya

Marcin Lutynski, PhD, DSc, prof. Sileziya texnologiya universiteti, Polsha

Márton Benke, Prof. Dr., professor, Mishkols universiteti, Vengriya

Tünde Kovács, t.f.d., prof. Óbuda universiteti, Vengriya

Anatoliy Gets, t.f.d., prof., Belarussiya milliy texnika univesiteti, Belarussiya

Pyotr Tsibulenko, t.f.d., prof., Belarussiya milliy texnika univesiteti,
Belarussiya

Shohrux Jo'rayev, t.f.d., dots., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar
universiteti, O'zbekiston

Nodir Doniyarov, t.f.d., prof., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar
universiteti, O'zbekiston

Behzod Tolibov, t.f.d., prof., O'zbekiston Respublikasi Innovatsion rivojlanish
agentligi, O'zbekiston

Abbos Shodiyev, t.f.d., prof. Qarshi davlat texnika universiteti, O'zbekiston

Baxriddin Voxidov, t.f.d., dots., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar
universiteti, O'zbekiston

O'tkir Nosirov, t.f.d., prof., Milliy texnologik tadqiqotlar universiteti MISiS
ning Olmaliq filiali, O'zbekiston

Gafur Nutfulloyev, t.f.d., dots., Milliy tadqiqotlar universiteti "MISIS" ning
Olmaliq shahridagi filiali, O'zbekiston

Utkir Xalikulov, t.f.d., prof., Olmaliq davlat texnika istituti, O'zbekiston

Shahboz Turdiyev, t.f.d., dots., Qarshi davlat texnika universiteti, O'zbekiston

Sarvar Parmonov, t.f.d., dotsent, Toshkent davlat texnika universiteti Olmaliq
filiali, O'zbekiston

Ulug'bek Hasanov, t.f.f.d., Olmaliq kon-metallurgiya kombinati, O'zbekiston

Jamoliddin Todjiyev, k.f.d., prof., O'zbekiston Milliy universiteti,
O'zbekiston

Asqar Parmonov, k.f.d., prof., O'zbekiston Milliy universiteti, O'zbekiston

Aktam Saidaxmedov, t.f.d., dots., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar
universiteti, Navoiy, O'zbekiston

Shaxriddin Turobov, t.f.f.d., dots., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar
universiteti, O'zbekiston

Rustam Nomdorov, t.f.f.d., Qarshi davlat texnika universiteti, O'zbekiston

Uchqun Eshonqulov, t.f.f.d., dots., Qarshi davlat texnika universiteti,
O'zbekiston

Oybek Qayumov, t.f.f.d., dots., Qarshi davlat texnika universiteti, O'zbekiston

Najmiddin Boymurodov, t.f.f.d., PhD., Qarshi davlat texnika universiteti,
O'zbekiston

*"Sanoatda raqamli texnologiyalar" (e-ISSN:3030-3214) ilmiy-texmik jurnali
O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi
Oliy attestatsiya komissiyasining 30-iyul 2024 yildagi №358-sonli qaroriga
asosan quyidagi ixtisosliklar bo'yicha texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori
(PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya
ishlari yuzasidan dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya
etilgan:*

- 05.00.00 - Texnika fanlari
- 04.00.00 - Geologiya-mineralogiya fanlari
- 02.00.00 - Kimyo fanlari

MUNDARIJA

KON-METALLURGIYA VA ISHLAB CHIQUARISH SANOATI

<i>Rahmonova Umida Toshpo'latovna, Xasanov Abdurashid Soliyevich, Saidaxmedov Aktam Abdisumiyovich.</i> Glitsinli eritmalarda oltinning erish kinetikasi va texnologik parametrlarini tadqiq qilish	13
<i>Jalolov Baxtiyorjon Adxamjon o'g'li, Mirzavaliyev Doston Boxodirovich, Qarshiyev Humoyun Komilovich, Kamalova Iroda Mamasaiid qizi.</i> Rux saqlovchi yoyli po'lat eritish pechi changining tavsifi va qayta ishlash imkoniyatlari tahlili	19
<i>Almatov Ilxomjon Mirzabek o'g'li, Xatamov G'ayrat Alimansurovich, Jabborov Ergash Yusuf o'g'li, Sodiqov Farrux Sobirjon o'g'li.</i> Yangi Angren va Angren issiqlik elektr stansiyalarining kul-shlak ag'darmalari hajmi va ulardan foydalanish istiqbollari o'rganish	30
<i>Almatov Ilxomjon Mirzabek o'g'li, Xatamov G'ayrat Alimansurovich, Botirov Mirmuxsin Sherali o'g'li, G'ulomov Ibroxim Inomjonovich.</i> Angren va Yangi Angren issiqlik elektr stansiyalari kul-shlak chiqindilaridan olingan texnologik namunalarning moddiy tarkibini tadqiq etish	37
<i>Istablavey Fevzi Feratovich, Ataqulov Lazizjon Nematovich, Jurayev Akbar Shavkatovich.</i> O'zbekiston tog'-kon sanoati korxonalari sharoitida karyer avtosamosvallari katta o'lchamli shinalarining temperatura rejimlarini tadqiq etish va ularning muddatidan oldin ishdan chiqish sabablari tahlil qilish	45
<i>Davlonov Xayrulla Allamuratovich, Uzboyev Maftun Dusiyarovich, Toshmamatov Bobir Mansurovich.</i> Biomassa piroliz suyuqligi va havo oqimining yonish kamerasidagi aerogidrodinamik holatini CFD modellash	55
<i>Eshonqulov Uchqun Xudoynazar o'g'li, Xasanov Abdirashid Saliyevich, Qarshiyev Humoyun Komilovich.</i> Kobalt tarkibli keklarni gidrometallurgik qayta ishlashning zamonaviy texnologiyalari	61
<i>Maxmarejabov Dilmurod Baxtiyarovich, Abdurasulova Zarina Xusniddinovna, Asilov Shodbay Nurullayevich, Jabborov Ergash Yusuf o'g'li.</i> Oksidlangan va aralash tipdagi mis rudalarini to'plovchi reagent yordamida flotatsiyalashni o'rganish	71
<i>Maxmarejabov Dilmurod Baxtiyarovich, Abdurasulova Zarina Xusniddinovna, Botirov Mirmuxsin Sherali o'g'li, Sodiqov Farrux Sobirjon o'g'li.</i> Oksidlanishga uchragan mis porfir ma'danlarni faollashtiruvchi reagent bilan flotatsiyalash mexanizmini o'rganish	76
<i>Botirov Shoxbos Soibjon o'g'li, Nomdorov Rustam Uralovich.</i> Radar interferometriyasi (InSAR) texnologiyasining nazariy asoslari va yer yuzasi deformatsiyalarini monitoring qilish imkoniyatlari	83
<i>Djurayev Rustam Umarxanovich, Turdiyev Sardorjon Abdumuminovich, Abdurakhmonov Otabek Usmon o'g'li, Jurayev Akbar Shavkatovich.</i> Karyer ekskavatori cho'mich tishlarining dinamik yuklanish sharoitida abraziv yemirilishini baholash	89
<i>Larionov Sergey Vladimirovich, Ergashev Mahmud Axbaraliyevich, Sidiqov Ravshan Mirzabekovich, Axmadaliyev Alisher Madaminovich.</i> Mis-porfir ma'danidan oltin va kumushni markazdan qochma konsentrator yordamida ajratib olishda G-omil va sikl vaqti ta'sirini faktorli tajriba asosida baholash	96
<i>Mustafoyev Azamat Botir o'g'li.</i> Ko'p o'zgaruvchili kriptografik tizimlar va ularning tahlili	105
<i>Karimov Yoqub Latipovich, Jumayev Ilhom Kudratovich, Olimov Farusxon Muzaffar o'g'li, Nomdorov Rustam Urolovich.</i> Kaliyli konlarda qazib olish chuqurligi ortishi bilan silvinit rudasini qazib olish tizimidagi parametrlarni geomekanik moslashtirish va nazariy asoslash	112
<i>Abdullayeva Samira Afgan qizi, Jabbarov Tohir Gaffar o'g'li.</i> Yuqori voltli o'chirgichlarning texnik holatini intellektual monitoring orqali ishonchliligini oshirish	126
<i>Rahmonova Umida Toshpo'latovna, Xasanov Abdurashid Soliyevich, Saidaxmedov Aktam Abdisamiyevich.</i> Marjonbuloq koni rudasidan oltinni JINCHAN reagenti yordamida tanlab eritishning texnologik samaradorligini natriy sianidi bilan qiyosiy baholash	134
<i>Shakarov Tulkun Ismatovich, Pulatov Xusanxon A'loxonovich.</i> Ko'pik hosil qiluvchilar konsentratsiyasi, aeratsiya jadalligi va suvli faza tarkibining flotatsiya tizimining gaz-dispers xususiyatlariga ta'siri	143
<i>Jumaniyozov Jumaniyoz Shavkat o'g'li, Jumaniyozov Maxsud Jabbiyevich.</i> Bitum emulsiyalarini ishlab chiqarishda qo'llaniladigan emulgator turlarining barqarorlikka ta'siri tahlili	150

<i>Sherbaev Javokhir Ravshan o'g'li, Abdumalikov Akmaljon Abduxoliq o'g'li.</i> K ₂ U-Node: uch fazali kuchlanishlar nosimmetrikligini monitoring qilish uchun ochiq kodli ikki avloddan iborat qurilmani loyihalash va validatsiya metodikasi	158
<i>Mislibayev Ilxom Tuychibayevich, Bo'riyev Feruz Mansur o'g'li, Nizomov To'liq Najimovich, Nurxonov Xusan Almirza o'g'li.</i> Yer osti kon lahimlarini ankerli mustahkamlashda mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalarning samaradorligini baholash	169
<i>Qurbonov Oybek Muhammadqulovich.</i> Markazdan qochma nasos ishchi g'ildiragi kuraklarining yuza teksturasini qiyosiy tahlil qilish va sonli baholash metodologiyasi	174
<i>Askarov Agzam Muratovich, Larionov Sergey Vladimirovich.</i> Qalmoqqir konining oksidlangan balansdan tashqari rudalarini shakllantirish tarixi va qayta ishlash istiqbollari	182
<i>Toshtemirov Umarali Tulqin o'g'li, Qosimov Muhiddin Odilovich, Yormatov Ozodbek Shermuhammad o'g'li, Bo'riyev Feruz Mansur o'g'li.</i> Kon lahimlarining suvlanganligini aniqlash va uning turg'unligiga ta'sirini baholash	189
<i>Qayumov Oybek Azamat o'g'li, Uzoqov Shaxrizod Zafarjon o'g'li, Larionov Sergey Vladimirovich.</i> Klinkerdan kumush va misni ajratib olish texnologiyasini tadqiq qilish	195
<i>Askarov Agzam Muratovich, Mamaisakova Zebo Bahodir qizi.</i> Mis-porfir minerallarini kompleks qayta ishlash jarayonida qimmatbaho metallar yo'qotilishini kamaytirishning texnologik asoslari	201

GEOLOGIYA VA NEFT-GAZ SANOATI

<i>Norqulov Shohbozbek Samandar o'g'li.</i> Ko'kdumaloq konida tovar neftini rezervuarlarda saqlashda bug'lanish yo'qotishlarini kamaytirishning texnik-iqtisodiy samaradorligi	207
<i>Rahmatullayev Ilhom Farmonqul o'g'li, Ashirbekov Akabir Botirovich.</i> Bokali intruzivi petrografiya va ma'dandorligi (Shimoliy Bukantov)	214
<i>Islamova Nilufar Fayzullayevna.</i> Toshkent shahrining seysmik jadalligining chuqurlik bo'yicha o'zgarishini baholash ..	220
<i>Tangirov Jasurbek Mixli o'g'li, Xabibullayev Saidaziz Shoxsuvorovich, Amirqulov Nuriddin Sayfullayevich, Muradullayev Doston Muzaffar o'g'li.</i> Neft konlarida foydalaniladigan texnik suvni tozalashda sorbsion-flotatsion jarayonlar kinetikasi va texnologik parametrlarini optimallashtirishning ilmiy asoslari	226
<i>Tangirov Jasurbek Mixli o'g'li, Xabibullayev Saidaziz Shoxsuvorovich, Amirqulov Nuriddin Sayfullayevich, Muradullayev Doston Muzaffar o'g'li.</i> Neft va gaz korxonalarida texnik suvni tozalash va tayyorlash texnologiyasi samaradorligini oshirishning ilmiy asoslari	231
<i>Abdullayev G'aybulla Sayfullayevich, Yuldashev Nazarbek Narziyevich, Davronov Nodirbek Nuriddin o'g'li.</i> Beshkent egilmasidagi quyi-o'rta terrigen yura yotqiziqlarining neftgazlilik istiqbollarini baholash (Chunagar koni misolida)	237
<i>G'ayratova Malika Zokirovna.</i> Haqiqiy va sintetik egri chiziqlarni taqqoslash orqali Buxoro-Xiva mintaqasi uchun akustik karetajni tiklashning optimal usulini tanlash	243
<i>Niyozov Dalir Botir o'g'li, Ikromov O'tkir Olimovich.</i> Xo'jabarku-Malyangur paleovulqoni andezitlari va ularning tuflarining petrografik xususiyatlari	250

KIMYOVIY TEXNOLOGIYA VA QURILISH

<i>Husenov Abdurasul O'ktamovich, Xadjibayev Diyor Asadullayevich, Sabirov Baxtiyor To'xtayevich.</i> Sanoat oqova suvlarini tozalash uchun bentonit asosidagi sorbsion materiallarni olishda istiqbolli xom ashyo konlarini tanlash va baholash	256
<i>Husenov Abdurasul O'ktamovich, Xadjibayev Diyor Asadullayevich, Sabirov Baxtiyor To'xtayevich.</i> Navbahor koni bentonit gilining xlorid kislotada yordamida modifikatsiyalanishi va uning fizik-kimyoviy xossalari tadqiq etish	262
<i>Shodiev Asliddin Faxriddin o'g'li, Muhiddinov Bahodir Fahriddinovich, Jo'rayev Shoxruh To'liqinovich, Shokirov Ravshan Qahramonovich.</i> Sof, chiqindi, qayta ishlangan va plastifikatsiyalangan poliuretan namunalarining qiyosiy termogravimetrik tahlili	268
<i>Shodiev Asliddin Faxriddin o'g'li, Muhiddinov Bahodir Fahriddinovich, Jo'rayev Shoxruh To'liqinovich, Shokirov Ravshan Qahramonovich.</i> 4,4'-Metilendifenildiizosianat asosidagi poliuretanlarning qovushqoqlik xossalari va makromolekulyar tavsiflarini viskozimetrik usulda tadqiq etish	277

Tursunboyev Alisher Qurbonmurod o'g'li, Ochilov Abduraxim Abdurasulovich, Maxmudov Rafiq Amonovich. Mahalliy xomashyolar asosida selluloza nanokristallari sintezi va ular asosida yuqori samarali adgezion kompozitsiyalar yaratish istiqbollari 283

Tursunboyev Alisher Qurbonmurod o'g'li, Ochilov Abduraxim Abdurasulovich, Maxmudov Rafiq Amonovich. Sellyuloza nanokristallari va funksional akril monomerlari o'rtasidagi kimyoviy reaksiyani tadqiq etish hamda ularning fizik-kimyoviy xossalarini o'rganish 290

Urishev Boboraim, Quvatov Ulug'bek Jalolovich, Ochilov Obid Boymurod o'g'li, Qulmatov Sanjar Xolmumin o'g'li. Irrigatsiya kanallarida mikroGES energiya ishlab chiqarishini gidrologik statistika va optimallashtirish modeli asosida baholash 297

YENGIL SANOAT TARMOQLARI

Axmedov Xamidulla Abduxoshimovich, Xaydarova Marjona Xayotovna. Tola ajratgich kolosnigi almashinuvchi elementining ishchi yuzasini ultratovushli ishlov berish orqali qattiqligini oshirish tadqiqotlari 303

Xamzayev Dilshod Inomdjonovich. Dielektrik xossalarining o'zgarishi asosida paxta tolasi namligini real vaqt rejimida o'lchash 310

EKOLOGIYA, MEHNAT MUHOFAZASI VA TEXNIKA XAVFSIZLIGI

Madarova Surayyo Uralovna. Mahalliy Artemisia biomassasidan bioetanol ishlab chiqarish 318

Davronbekov Dilmurod Abduljalilovich, Pisetskiy Yuriy Valerevich. Xavfli gaz chiqishini aniqlash ehtimoli yo'qotilishini cheklagan holda veyvlet chegarasini sozlash 323

G'ayimnazarov Israil Xoliqovich, Toshmurodov Jomurod Jahongir o'g'li. Grunt o'zanli kanallarda oqiziqlar sarfini hisoblash usullarini takomillashtirish 330

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГОРНОДОБЫВАЮЩАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И ОБРАБАТЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Рахмонова Умида Тошпулатовна, Хасанов Абдурашид Солиевич, Саидахмедов Актам Абдисамиевич.</i> Исследование влияния реагентов цианида натрия и «Золотой Секи» на извлечение редких металлов из руды	13
<i>Жалолов Бахтиёржон Адхамжон угли, Мирзалиев Достон Бахадирович, Каршиев Хумоюн Комилович, Камалова Ирода Мамасайд кизи.</i> Характеристика и анализ возможностей переработки цинксодержащей пыли дуговой сталеплавильной печи	19
<i>Алматов Илхомжон Мирзабек угли, Хатамов Гайрат Алимансурович, Жабборов Эргаи Юсуф угли, Садыков Фаррух Собиржон угли.</i> Исследование объемов золошлаковых отвалов Ново-Ангренской и Ангренской тепловых электростанций и перспектив их использования	30
<i>Алматов Илхомжон Мирзабек угли, Хатамов Гайрат Алимансурович, Ботиров Мирмухсин Шерали угли, Гуломов Иброхим Иномжонович.</i> Исследование вещественного состава технологических проб, полученных из золошлаковых отходов Ангренской и Ново-Ангренской тепловых электростанций	37
<i>Истаблаев Февзи Фератович, Атакулов Лазизжон Нематович, Жураев Акбар Шавкатович.</i> Исследование температурных режимов крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов и анализ причин их преждевременного отказа в условиях горнодобывающих предприятий Узбекистана	45
<i>Давлонов Хайрулла Алламуротович, Узбоев Мафтун Дусиярович, Тошмаматов Бобир Мансурович.</i> CFD моделирование аэрогидродинамического состояния пиролизной жидкости биомассы и воздушного потока в камере сгорания	55
<i>Эшонкулов Учкун Худойназар угли, Хасанов Абдирашид Салиевич, Каршиев Хумоюн Комилович.</i> Современные технологии гидрометаллургической переработки кобальтосодержащих кеков	61
<i>Махмарезжабов Дилмурод Бахтиярович, Абдурасулова Зарина Хусниддиновна, Асиров Шодбай Нуруллаевич, Жабборов Эргаи Юсуф угли.</i> Изучение флотации окисленных и смешанных медных руд с использованием собирательного реагента	71
<i>Махмарезжабов Дилмурод Бахтиярович, Абдурасулова Зарина Хусниддиновна, Ботиров Мирмухсин Шерали угли, Садилов Фаррух Собиржон угли.</i> Исследование механизма флотации подвергшихся окислению медно-порфировых руд с применением реагента-активатора	76
<i>Ботиров Шохбос Соибжон угли, Номдоров Рустам Уралович.</i> Теоретические основы технологии радиолокационной интерферометрии (InSAR) и возможности мониторинга деформаций земной поверхности	83
<i>Джуроев Рустам Умарханович, Турдиев Сардоржон Абдумуминович, Абдурахмонов Отабек Усмон угли, Жураев Акбар Шавкатович.</i> Оценка абразивного износа зубьев ковша карьерного экскаватора в условиях динамического нагружения	89
<i>Ларионов Сергей Владимирович, Еришегов Махмуд Ахбаралиевич, Сидиков Равшан Мирзабекович, Ахмадиев Алишер Мадаминович.</i> Оценка влияния G-фактора и времени цикла при извлечении золота и серебра из медно-порфировой руды с помощью центробежного концентратора на основе факторного эксперимента	96
<i>Мустафаев Азамат Ботир угли.</i> Многопеременные криптографические системы и их анализ	105
<i>Каримов Ёкуб Латипович, Жумаев Илхом Кудратович, Олимов Фарухон Музаффар угли, Номдоров Рустам Уролович.</i> Геомеханическая адаптация и теоретическое обоснование параметров системы разработки силвинитовых руд при увеличении глубины разработки калийных месторождений	112
<i>Абдуллаева Самира Афган кызы, Джаббаров Тахир Гаффар оглы.</i> Повышение надёжности высоковольтных выключателей через интеллектуальный мониторинг технического состояния	126
<i>Рахмонова Умида Тошпулатовна, Хасанов Абдурашид Солиевич, Саидахмедов Актам Абдисамиевич.</i> Сравнительная оценка технологической эффективности избирательного выщелачивания золота из руды месторождения Маржонбулок с помощью реагента JINCHAN и цианида натрия	134
<i>Шакаров Тулкин Исматович, Пулатов Хусанхон Аълохонович.</i> Влияние концентрации пенообразователей, интенсивности аэрации и состава водной фазы на газодисперсные характеристики флотационной системы	143
<i>Жуманиёзов Жуманиёз Шавкатович, Жуманиязов Махсуд Джаббиевич.</i> Обзор влияния типов эмульгаторов, применяемых при производстве битумных эмульсий, на их стабильность	150

<i>Шербаев Джавохир Равшан угли, Абдумаликов Акмалжон Абдухолик угли.</i> K ₂ U-Node: проектирование и методика валидации двухпоколенного устройства с открытым исходным кодом для мониторинга несимметрии трёхфазных напряжений	158
<i>Мислибаев Илхом Туйчибаевич, Буриев Феруз Мансур угли, Низомов Тулкин Нажимович, Нурхонов Хусан Алмирза угли.</i> Оценка эффективности двухкомпонентных ампул на основе минеральной композиции при анкерном креплении подземных горных выработок	169
<i>Курбонов Ойбек Мухаммадулович.</i> Методология сравнительного анализа и численной оценки текстуры поверхности лопаток рабочего колеса центробежного насоса	174
<i>Аскарлов Агзам Муратович, Ларионов Сергей Владимирович.</i> История формирования и перспективы переработки окисленных забалансовых руд месторождения Кальмакыр	182
<i>Тоштемуров Умарали Тулкинович, Косимов Мухиддин Одилович, Ярматов Озодбек Шермухаммат угли, Буриев Феруз Мансур угли.</i> Определение обводненности горных выработок и оценка её влияния на устойчивость	189
<i>Каюмов Ойбек Азамат угли, Узоков Шахризод Зафаржон угли, Ларионов Сергей Владимирович.</i> Исследование технологии извлечения серебра и меди из клинкера	195
<i>Аскарлов Агзам Муратович, Мамаисакова Зебо Баходир кизи.</i> Технологические основы снижения потерь благородных металлов при комплексной переработке медно-порфировых руд	201

ГЕОЛОГИЯ И НЕФТЕГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Норкулов Шохбозбек Самандар угли.</i> Техничко-экономическая эффективность снижения потерь нефти от испарения при резервуарном хранении на месторождении Кокдумалак	207
<i>Рахматуллаев Илхом Фармонкул угли, Аширбеков Акабир Ботирович.</i> Петрография и рудоносность Бокалинского интрузива (Северный Букантау)	214
<i>Исламова Нилуфар Файзуллаевна.</i> Оценка изменения сейсмической интенсивности города Ташкента по глубине	220
<i>Тангиров Жасурбек Михли угли, Хабибуллаев Саидазиз Шохусурович, Амиркулов Нуриддин Сайфуллаевич, Мурадуллаев Достон Музаффар угли.</i> Научные основы кинетики сорбционно-флотационных процессов и оптимизации технологических параметров при очистке технической воды, используемой на нефтяных	226
<i>Тангиров Жасурбек Михли угли, Хабибуллаев Саидазиз Шохусурович, Амиркулов Нуриддин Сайфуллаевич, Мурадуллаев Достон Музаффар угли.</i> Научные основы повышения эффективности технологии очистки и подготовки технической воды на нефтегазовых предприятиях	231
<i>Абдуллаев Гайбулла Сайфуллаевич, Юлдашев Назарбек Нарзиевич, Давронов Нодирбек Нуриддин угли.</i> Оценка перспектив нефтегазоносности терригенных отложений нижней и средней юры Бешкентского прогиба (на примере месторождения Чунагар)	237
<i>Гайратова Малика Зокировна.</i> Выбор оптимального метода восстановления акустического каротажа для Бухара-Хивинского региона путем сравнения реальных и синтетических кривых	243
<i>Ниёзов Далир Ботир угли, Икромов Уткир Олимович.</i> Петрографические особенности андезитов палеовулкана Ходжабарку–Маянгур и их туфов	250

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВО

<i>Хусенов Абдурашул Уктамович, Хаджибаев Диёр Асадуллаевич, Сабиров Бахтиёр Тохтаевич.</i> Выбор и оценка перспективных месторождений бентонитового сырья для получения сорбционных материалов, предназначенных для очистки промышленных сточных вод	256
<i>Хусенов Абдурашул Уктамович, Хаджибаев Диёр Асадуллаевич, Сабиров Бахтиёр Тохтаевич.</i> Исследование модификации бентонитовой глины Навбахорского месторождения соляной кислотой и её физико-химических свойств	262
<i>Шодиев Аслиддин Фахриддин угли, Мухиддинов Баходир Фахриддинович, Жураев Шохрух Тулкинович, Шокиров Равшан Кахрамонович.</i> Сравнительный термогравиметрический анализ образцов чистого, отработанного, переработанного и пластифицированного полиуретана	268

<i>Шодиев Аслиддин Фахриддин угли, Мухиддинов Баходир Фахриддинович, Жураев Шохрух Тулкинович, Шокиров Равшан Кахрамонович.</i> Исследование вязкостных свойств и макромолекулярных характеристик полиуретанов на основе 4,4'-метиленидифенилдиизоцианата вискозиметрическим методом	277
<i>Турсунбоев Алишер Курбонмурод угли, Очилов Абдурахим Абдурасулович, Махмудов Рафик Амонович.</i> Перспективы синтеза нанокристаллов целлюлозы на основе местного сырья и создания на их основе высокоэффективных адгезионных композиций	283
<i>Турсунбоев Алишер Курбонмурод угли, Очилов Абдурахим Абдурасулович, Махмудов Рафик Амонович.</i> Исследование химической реакции между нанокристаллами целлюлозы и функциональными акриловыми мономерами, а также изучение их физико-химических свойств	290
<i>Уришев Бобораим, Куватов Улугбек Жалолович, Очилов Обид Боймурод угли, Кулматов Санжар Холмунин угли.</i> Оценка выработки электроэнергии микроГЭС в оросительных каналах на основе гидрологической статистики и модели оптимизации	297

ЛЕГКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Ахмедов Хамидулла Абдухошимович, Хайдарова Маржона Хаётовна.</i> Исследования повышения твёрдости рабочей поверхности сменного элемента колосника волокноотделителя путём ультразвуковой обработки	303
<i>Хамзаев Дилишод Иномджонович.</i> Измерение влажности хлопка в реальном времени на основе изменения диэлектрических свойств волокна	310

ЭКОЛОГИЯ, ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Мадарова Сурайё Ураловна.</i> Производство биоэтанола из местной биомассы Artemisia	318
<i>Давронбеков Дилмурод Абдужалилович, Писецкий Юрий Валерьевич.</i> Настройка вейвлетного порога с ограничением потери вероятности обнаружения опасного выброса газов	323
<i>Гайимназаров Израил Холикович, Тошмуродов Жомурод Жахонгир угли.</i> Совершенствование методов расчёта расхода наносов в каналах с грунтовым руслом	330

CONTENTS

MINING METALLURGY AND MANUFACTURING INDUSTRY

Rahmonova Umida Toshpulatovna, Khasanov Abdurashid Solievich, Saidakhmedov Aktam Abdisamievich. A study on the effect of sodium cyanide and Gold Cicada reagents on the extraction of precious metals from ore	13
Jalolov Bakhtiyorjon Adkhamjon ugli, Mirzavaliyev Doston Bokhodiroyevich, Karshiyev Khumoyun Komilovich, Kamalova Iroda Mamasaid kizi. Characteristics and analysis of processing options for zinc-bearing dust from electric arc furnaces ..	19
Almatov Ilkhomjon Mirzabek ugli, Khatamov Gayrat Alimansurovich, Jabborov Ergash Yusuf ugli, Sodiqov Farrukh Sobirjon ugli. Study of the volume of ash and slag dumps at the New Angren and Angren thermal power plants and prospects for their utilization	30
Almatov Ilkhomjon, Khatamov Gayrat, Botirov Mirmukhsin, Jabbarov Ergash. Study of the material composition of technological samples obtained from ash and slag wastes of the Angren and Novo-Angren thermal power plants	37
Istablaev Fevzi Feratovich, Ataqulov Lazizjon Nematovich, Zhuraev Akbar Shavkatovich. Investigation of temperature regimes of large-size tyres of mining dump trucks and analysis of the causes of their premature failure in the conditions of mining enterprises of Uzbekistan	45
Davlonov Khayrulla Allamuratovich, Uzboev Maftun Dusiyarovich, Toshmamatov Bobir Mansurovich. CFD modeling of the aerohydrodynamic behavior of biomass pyrolysis liquid and airflow in a combustion chamber	55
Eshonkulov Uchkun Khudoynazar ugli, Khasanov Abdurashid Solievich, Karshiev Khumoyun Komilovich. Modern hydrometallurgical technologies for the processing of cobalt-containing cakes	61
Maxmarejabov Dilmurod Bakhtiyarovich, Abdurasulova Zarina Xusniddinovna, Asilov Shodbay Nurullayevich, Jabborov Ergash Yusuf ugli. Investigation into the flotation of oxidized and mixed copper ores using a collector reagent	71
Maxmarejabov Dilmurod Bakhtiyarovich, Abdurasulova Zarina Xusniddinovna, Botirov Mirmukhsin Sherali ugli, Sodiqov Farrukh Sobirjon ugli. Study on the flotation mechanism of weathered copper porphyry ores with the application of an activator reagent	76
Botirov Shoxbos Soibjon ugli, Nomdorov Rustam Uralovich. Theoretical foundations of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology for ground surface deformation monitoring	83
Djurayev Rustam Umarxanovich, Turdiyev Sardorjon Abdumuminovich, Abdurakhmonov Otabek Usmon ugli, Zhuraev Akbar Shavkatovich. Assessment of abrasive wear of open-pit excavator bucket teeth under dynamic loading conditions ..	89
Larionov Sergey Vladimirovich, Ershegeev Makhmud Akhbaraliyevich, Sidikov Ravshan Mirzabekovich, Akhmadiyev Alisher Madaminovich. Evaluation of the effect of G-factor and cycle time on gold and silver recovery from copper-porphyry ore using a centrifugal concentrator based on a factorial experiment	96
Mustafaev Azamat Botir ugli. Multivariate cryptographic systems and their analysis	105
Karimov Yokub Latipovich, Jumaev Ilhom Kudratovich, Olimov Faruskhon Muzaffar ugli, Nomdorov Rustam Urolovich. Geomechanical adaptation and theoretical justification of sylvinit ore mining system parameters with increasing mining depth in potash deposits	112
Abdullayeva Samira Afgan gyzy, Jabbarov Tahir Gafar oglu. Improving the reliability of high-voltage circuit breakers through intelligent condition monitoring	126
Rahmonova Umida Toshpulatovna, Khasanov Abdurashid Solievich, Saidakhmedov Aktam Abdisamievich. Comparative evaluation of the technological efficiency of selective gold leaching from Marjonbuloq ore using JINCHAN reagent and sodium cyanide	134
Shakarov Tulkin Ismatovich, Pulatov Khusankhon A'lokhonovich. Effect of foaming agent concentration, aeration intensity, and aqueous phase composition on the gas-dispersion characteristics of a flotation system	143
Jumaniyozov Jumaniyoz Shavkat ugli, Jumaniyazov Maxsud Jabbiyevich. Review of the influence of emulsifier types used in producing bitumen emulsions on emulsion stability	150
Sherbaev Javokhir, Abdumalikov Akmal. K ₂ U-Node: design and validation methodology of an open-source two-generation device for three-phase voltage-unbalance monitoring	158
Mislibayev Ilkhom Tuychibayevich, Boriyev Feruz Mansur ugli, Nizomov Tolqin Najimovich, Nurkhonov Khusan Almirza ugli. Evaluation of the effectiveness of two-component mineral-composite capsules for rock bolting in underground mine workings	169

Kurbonov Oybek Muhammadkulovich. Methodology for comparative analysis and numerical evaluation of the surface texture of centrifugal pump impeller blades	174
Askarov Agzam Muratovich, Larionov Sergey Vladimirovich. History of formation and prospects for processing oxidized off-balance ore of the Kalmakyr deposit	182
Toshtemirov Umarali Tulqin ogli, Kosimov Mukhiddin Odilovich, Yormatov Ozodbek Shermuhammat ugli, Boriyev Feruz Mansur ugli. Determination of water saturation of mine workings and assessment of its impact on stability	189
Kayumov Oybek Azamat ugli, Uzokov Shakhriyoz Zafarjon ugli, Larionov Sergey Vladimirovich. A study of technology for the extraction of silver and copper from clinker	195
Askarov Agzam Muratovich, Mamaisakova Zebo Bahodir kizi. Technological foundations of reducing losses of precious metals during comprehensive processing of copper-porphyry minerals	201

GEOLOGY AND OIL-GAS INDUSTRY

Norkulov Shokhbozbek Samandar ugli. Technical and economic efficiency of reducing evaporation losses during tank storage of crude oil at the Kokdumalak field	207
Rahmatullayev Ilhom Farmonqul ugli, Ashirbekov Akabir Botirovich. Petrography and ore potential of the Bokali intrusion (Northern Bukantau)	214
Islamova Nilufar Fayzullaevna. Assessment of the depth-dependent variation in seismic intensity of the city of Tashkent	220
Tangirov Jasurbek Mikhli ugli, Khabibullayev Saidaziz Shokhsuvorovich, Amirqulov Nuritdin Sayfullayevich, Muradullayev Doston Muzaffar ugli. Scientific foundations of the kinetics of sorption-flotation processes and optimization of technological parameters for the purification of technical water used in oil fields	226
Tangirov Jasurbek Mikhli ugli, Khabibullayev Saidaziz Shokhsuvorovich, Amirqulov Nuritdin Sayfullayevich, Muradullayev Doston Muzaffar ugli. Scientific basis for improving the efficiency of technical water purification and treatment technology at oil and gas enterprises	231
Abdullayev Gaybulla Sayfullayevich, Yuldashev Nazarbek Narziyevich, Davronov Nodirbek Nuriddin ugli. Evaluation of the hydrocarbon potential of the Lower–Middle Jurassic terrigenous sequences in the Beshkent Trough (using the Chunagar deposit as an example)	237
Gayratova Malika Zokirovna. Selection of the optimal acoustic logging restoration method for the Bukhara–Khiva region by comparing real and synthetic curves	243
Niyozov Dalir Botir ugli, Ikromov O'tkir Olimovich. Petrographic characteristics of the andesites and tuffs of the Khojabarku–Malyangur paleovolcano	250

CHEMICAL TECHNOLOGY AND CONSTRUCTION

Husenov Abdurasul Uktamovich, Xadjibayev Diyor Asadullayevich, Sabirov Baxtiyor Toxtayevich. Selection and evaluation of promising bentonite deposits for the production of sorption materials used in industrial wastewater treatment	256
Husenov Abdurasul Uktamovich, Xadjibayev Diyor Asadullayevich, Sabirov Baxtiyor Toxtayevich. Investigation of hydrochloric acid modification of Navbahor bentonite clay and its physicochemical properties	262
Shodiev Asliddin Fakhridin ugli, Muhiddinov Bahodir Fakhridinovich, Jurayev Shokhruh Tulkinovich, Shokirov Ravshan Kahramonovich. Comparative thermogravimetric analysis of virgin, waste, recycled, and plasticized polyurethane samples	268
Shodiev Asliddin Fakhridin ugli, Muhiddinov Bahodir Fakhridinovich, Jurayev Shokhruh Tulkinovich, Shokirov Ravshan Kahramonovich. Viscosity properties and macromolecular characteristics of polyurethanes based on 4,4'-methylenediphenyl diisocyanate studied by the viscometric method	277
Tursunboyev Alisher Kurbonmurod ugli, Ochilov Abdurakhim Abdurasulovich, Makhmudov Rafik Amonovich. Prospects for the synthesis of cellulose nanocrystals based on local raw materials and the creation of high-performance adhesive composites based on them	283

Tursunboyev Alisher Kurbonmurod ugli, Ochilov Abdurakhim Abdurasulovich, Makhmudov Rafik Amonovich. Investigation of the chemical reaction between cellulose nanocrystals and functional acrylic monomers, and study of their physicochemical properties 290

Urishev Boboraim, Quvatov Ulugbek Jalolovich, Ochilov Obid Boymurod ugli, Qulmatov Sanjar Xolmumin ugli. Assessing micro hydropower generation in irrigation canals based on hydrological statistics and an optimization model . 297

LIGHT INDUSTRIES

Akhmedov Khamidulla, Khaydarova Marjona. Studies on increasing the hardness of the working surface of the replaceable element of a fiber separator grid bar by ultrasonic treatment 303

Khamzaev Dilshod Inomdjonovich. Real-time measurement of cotton moisture based on changes in the dielectric properties of the fiber 310

ECOLOGY, LABOR PROTECTION AND TECHNICAL SAFETY

Madarova Surayyo Uralovna. Production of bioethanol from indigenous Artemisia biomass 318

Davronbekov Dilmurod Abdujalilovich, Pisetskiy Yuriy Valerevich. Wavelet-threshold tuning with a constraint on hazardous-emission gas detection-probability loss 323

Gaimnazarov Israil Kholikovich, Toshmurodov Jomurod Jahongir ugli. Improvement of methods for calculating sediment discharge in alluvial channels 330

KON-METALLURGIYA VA ISHLAB CHIQRISH SANOATI
ГОРНОДОБЫВАЮЩАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И ОБРАБАТЫВАЮЩАЯ
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ
MINING METALLURGY AND MANUFACTURING INDUSTRY

UO'K: 669.5/.6

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.2

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

GLITSINLI ERITMALARDA OLTINNING ERISH KINETIKASI VA
TEKNOLOGIK PARAMETRLARINI TADQIQ QILISH



**Rahmonova Umida
Toshpo'latovna**

Qarshi davlat texnika universiteti,
Mustaqil izlanuvchi, Qarshi,
O'zbekiston
Email:
Raxmanova4302@gmail.com
ORCID ID: 0009-0000-8279-0138
Science ID: MUZ-0426-0028



**Xasanov Abdurashid
Soliyevich**

Texnika fanlari doktori, professor,
"Olmaliq kon-metallurgiya
kombinati" AJ Innovatsion
texnologiyalarni rivojlantirish va
joriy etish markazi texnologiya
bo'yicha direktor o'rinbosari,
Olmaliq, O'zbekiston
E-mail: a.xasanov@srt-journal.uz
ORCID ID: 0009-0004-9162-7622
Science ID: DTV-1225-0005



**Saidaxmedov Aktam
Abdisamiyevich**

Navoiy davlat konchilik va
texnologiyalar universiteti, t.f.d.,
dotsent, Navoiy, O'zbekiston
E-mail: aktam.saidaxmedov@bk.ru
ORCID ID: 0000-0002-0482-3413
Science ID: DSN-1225-0001

Annotatsiya. Ushbu tadqiqotda Marjonbuloq koni boyitish chiqindilaridan oltinni glitsin yordamida ajratib olish jarayoni o'rganilgan. Tadqiqotda glitsin konsentratsiyasi, bo'tana tarkibidagi qattiq zarralar miqdori, Cu^{2+} ionlarining katalitik ta'siri hamda marganes oksidi ishtirokida dastlabki oksidlash jarayonining oltinni erish samaradorligiga ta'siri baholangan. Tajribalar natijasida nisbatan suyuq bo'tanada va dastlabki oksidlash sharoitida oltinni erish darajasi yuqori bo'lishi aniqlangan. Olingan natijalar glitsinli tanlab eritishning ekologik xavfsiz va istiqbolli texnologiya ekanligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: oltin, glitsin, tanlab eritish, boyitish chiqindilari, marganes oksidi, mis ionlari, oksidlash, gidrometallurgiya.

Received: 02.07.2026

Accepted: 21.07.2026

Issue publication: 28.09.2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАГЕНТОВ ЦИАНИДА НАТРИЯ И
ЗОЛОТОЙ СЕКИ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ ИЗ РУДЫ

**Рахмонова Умида
Тошпулатовна**

Самостоятельный соискатель
Кариинского государственного
технического университета,
Кариин, Узбекистан

**Хасанов Абдурашид
Солиевич**

Доктор технических наук,
профессор, заместитель
директора по технологиям
Центра развития и внедрения
инновационных технологий АО
«Алмалыкский горно-
металлургический комбинат»,
Алмалык, Узбекистан

**Саидахмедов Актам
Абдисамиевич**

Доктор философии (PhD) по
техническим наукам, доцент,
Навоийский государственный
университет горного дела и
технологий, Навои, Узбекистан

Аннотация. В данном исследовании изучен процесс извлечения золота из хвостов обогащения месторождения Марджанбулак с использованием глицина. В ходе исследования была оценена эффективность выщелачивания золота в зависимости от концентрации глицина, содержания твёрдых частиц в пульпе, каталитического влияния ионов Cu^{2+} , а также предварительного окисления в присутствии оксида марганца. Эксперименты показали, что степень извлечения золота повышается в относительно разбавленной пульпе и при условии предварительного окисления. Полученные результаты свидетельствуют о том, что глициновое выщелачивание является экологически безопасной и перспективной технологией.

Ключевые слова: золото, глицин, селективное выщелачивание, хвосты обогащения, оксид марганца, ионы меди, окисление, гидрометаллургия.

A STUDY ON THE EFFECT OF SODIUM CYANIDE AND GOLD CICADA REAGENTS ON THE EXTRACTION OF PRECIOUS METALS FROM ORE

**Rahmonova Umida
Toshpulatovna**

Independent Researcher, Karshi
State Technical University, Karshi,
Uzbekistan

**Khasanov Abdurashid
Solievich**

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Deputy Director for
Technology, Center for the
Development and Implementation of
Innovative Technologies, JSC
"Almalyk Mining and Metallurgical
Combine", Almalyk, Uzbekistan

**Saidakhmedov Aktam
Abdisamievich**

PhD in Technical Sciences,
Associate Professor, Navoi State
University of Mining and
Technologies, Navoi, Uzbekistan

Abstract. This study investigates the process of extracting gold from the enrichment tailings of the Marjonbuloq deposit using glycine. The research evaluated the effects of glycine concentration, the solid particle content in the pulp, the catalytic effect of Cu^{2+} ions, and a preliminary oxidation process in the presence of manganese oxide on the efficiency of gold dissolution. The experiments revealed that a higher degree of gold dissolution is achieved in a relatively dilute pulp and under preliminary oxidation conditions. The results obtained demonstrate that glycine leaching is an environmentally safe and promising technology.

Keywords: gold, glycine, selective leaching, beneficiation tailings, manganese oxide, copper ions, oxidation, hydrometallurgy.

Kirish. Oltinni ruda va texnogen chiqindilardan ajratib olishda gidrometallurgik usullar muhim ahamiyat kasb etadi. Hozirgi vaqtda eng keng qo'llaniladigan texnologiyalardan biri natriy sianidi NaCN ishtirokidagi sianlash jarayoni hisoblanadi. Ushbu usul yuqori samaradorlikka ega bo'lsa-da, sianid birikmalarining yuqori zaharliliigi atrof-muhitga salbiy ta'sir ko'rsatadi hamda texnologik xavfsizlik bilan bog'liq qator muammolarni keltirib chiqaradi. Shu sababli

keyingi yillarda ekologik jihatdan xavfsiz va selektiv reagentlar asosida oltinni ajratib olish texnologiyalarini ishlab chiqishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

Glitsin $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ ishtirokidagi tanlab eritish jarayoni oltinni ajratib olishning istiqbolli yo'nalishlaridan biri sifatida qaralmoqda. Glitsin ishqoriy muhitda oltin bilan barqaror kompleks birikmalar hosil qilib, uni eritmaga o'tkazish xususiyatiga ega. Biroq glitsinli tizimlarda oltinning

erish tezligi sianlash jarayoniga nisbatan pastroq bo'lganligi sababli, jarayonni jadallashtirish maqsadida turli oksidlovchilardan foydalanish taklif etilgan. Ayniqsa, marganes oksidi va vodorod peroksidi ishtirokida oltinning eritmaga o'tish darajasi sezilarli ortishi aniqlangan.

Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, Cu^{2+} ionlari glitsinli muhitda katalitik faollikni oshirib, oltinning eritmaga o'tish tezligini jadallashtiradi. Bundan tashqari, bo'tana tarkibidagi qattiq zarrachalar miqdori ham jarayon samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Qattiq faza miqdori ortishi bilan eritmaning qovushqoqligi oshib, reagentlarning mineral yuzasiga ta'siri cheklanadi va natijada oltinning erish darajasi pasayadi.

Mazkur tadqiqotda Marjonbuloq koni boyitish chiqindilaridan oltinni glitsin asosida tanlab eritish jarayoni o'rganildi. Tadqiqotda glitsin konsentratsiyasi, Cu^{2+} ionlarining katalitik ta'siri, bo'tanadagi qattiq zarrachalar miqdori hamda marganes oksidi yordamida dastlabki oksidlashning oltinning eritmaga o'tish darajasiga ta'siri baholandi. Olingan natijalar ekologik xavfsiz glitsinli eritish texnologiyasining oltin saqlovchi texnogen chiqindilarni qayta ishlashdagi istiqbolli yo'nalishlardan biri ekanligini ko'rsatdi.

Adabiyotlar tahlili. Oltinni gidrometallurgik usulda ajratib olish texnologiyalari uzoq yillar davomida ilmiy tadqiqotlarning asosiy yo'nalishlaridan biri bo'lib kelmoqda. An'anaviy sianlash usuli yuqori texnologik samaradorlikka ega bo'lsa-da, natriy sianidning yuqori toksikligi ekologik xavfsizlik bilan bog'liq muammolarni yuzaga keltiradi. Shu sababli keyingi yillarda ekologik xavfsiz reagentlardan foydalanishga asoslangan muqobil texnologiyalarni ishlab chiqish dolzarb masalalardan biriga aylangan.

Q.S. Sanaqulov va A.S. Xasanovlarning tadqiqotlarida konchilik chiqindilarini qayta ishlashda ekologik xavfsiz texnologiyalarni qo'llash zarurligi asoslab berilgan. Mualliflar texnogen chiqindilar tarkibidagi qimmatbaho komponentlarni qayta tiklashda gidrometallurgik usullarni qo'llash ekologik va iqtisodiy jihatdan samarali ekanligini ta'kidlaganlar. Ayniqsa, toksik reagentlarni kam zaharli moddalar bilan almashtirish istiqbolli yo'nalish sifatida ko'rsatib o'tilgan.

A.A. Mo'minov va X.Z. Yusupov tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda oltin saqlovchi rudalarni

gidrometallurgik qayta ishlash texnologiyalari tahlil qilingan. Tadqiqotchilar sianlash jarayonining asosiy afzalliklari bilan bir qatorda uning ekologik kamchiliklarini ham ko'rsatib berganlar. Mualliflarning fikricha, alternativ erituvchilarni qo'llash oltin ajratib olish jarayonida ekologik xavfsizlikni oshirish bilan birga texnologik samaradorlikni ham yaxshilashi mumkin.

E.A. Oraby va J.J. Eksteen glitsin asosidagi eritish jarayonlarini tadqiq qilib, glitsin konsentratsiyasi va ishqoriy muhitning oltinning eritmaga o'tish darajasiga sezilarli ta'sir ko'rsatishini aniqlaganlar. Ularning tadqiqotlarida glitsin oltin bilan barqaror kompleks hosil qilishi va past toksikligi sababli ekologik xavfsiz reagent sifatida baholangan. Shu bilan birga, glitsinli tizimlarda eritish tezligi sianlash jarayoniga nisbatan sekinroq kechishi qayd etilgan.

E.A. Oraby hamda hammualliflari tomonidan olib borilgan keyingi tadqiqotlarda glitsinli eritish tizimida marganes oksididan oksidlovchi reagent sifatida foydalanish samaradorligi o'rganilgan. Mualliflar marganes oksidi ishtirokida oltinning eritmaga o'tish darajasi sezilarli oshishini aniqlaganlar. Tadqiqot natijalariga ko'ra, MnO_4^{2-} ionlari oltin yuzasining oksidlanishini jadallashtirib, glitsin bilan kompleks hosil bo'lish jarayonini faollashtiradi.

M.G. Aylmore o'z ilmiy ishlarida sianidga alternativ erituvchilarni tahlil qilib, glitsinli eritish texnologiyasining istiqbolli jihatlarini ko'rsatib bergan. Tadqiqotlarda glitsinning ekologik xavfsizligi, reagent sarfining nisbatan pastligi va texnogen chiqindilarni qayta ishlashdagi samaradorligi alohida qayd etilgan. Shu bilan birga, muallif glitsinli eritish jarayonida oksidlovchi reagentlar va katalitik ionlardan foydalanish jarayon tezligini oshirishda muhim omil ekanligini ta'kidlagan.

Tahlil qilingan ilmiy manbalar shuni ko'rsatadiki, glitsin asosidagi tanlab eritish texnologiyasi oltin saqlovchi rudalar va boyitish chiqindilarini qayta ishlashda ekologik xavfsiz hamda istiqbolli yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Shu bilan birga, jarayon samaradorligini oshirish uchun oksidlovchilar, katalitik ionlar va optimal texnologik parametrlarni tanlash muhim ahamiyat kasb etadi.

Tadqiqot metodologiyasi. Tadqiqot ishida Marjonbuloq koni boyitish fabrikasi chiqindilaridan

oltinni glitsin asosida tanlab eritish jarayonining texnologik parametrlari o'rganildi. Tajriba ishlari laboratoriya sharoitida amalga oshirilib, dastlabki namunalarning fizik-kimyoviy tarkibi tahlil qilindi. Olingan namunalar halqa va konus usulida aralashtirilib qisqartirildi hamda massasi 400 g bo'lgan alohida namunalarga ajratildi. Chiqindi saqlash omboridan olingan namunalar xalqa va konus usulida aralashtirilib, qisqartirildi va tanlab eritish jarayoni o'tkazish uchun massasi 400 grammdan bo'lgan 10 ta namunaga ajratildi (1-rasm).

Tadqiqotlarda analitik darajadagi reagentlar va distillangan suv asosida tayyorlangan eritmalaridan foydalanildi. Asosiy reagent sifatida glitsin $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$, katalitik qo'shimcha sifatida mis sulfat pentagidrat $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, muhit pH qiymatini boshqarish uchun natriy gidroksid NaOH hamda oksidlovchi reagent sifatida marganes oksidi qo'llanildi.



1-rasm. Boyitish chiqindilari namunalarini tayyorlash va qismlarga ajratish sxemasi.

Dastlab chiqindining tanlab eritish xususiyatlarini aniqlash maqsadida sianlash sinovlari o'tkazildi. Tajribalar 2 kg/t NaCN sarfi, $\text{pH}=11$, bo'tanadagi qattiq faza miqdori 50% va xona harorati sharoitida olib borildi. Keyingi bosqichda glitsin asosidagi tanlab eritish jarayonlari tadqiq qilindi. Bunda glitsin konsentratsiyasi 0,5–2,5 M oralig'ida, Cu^{2+} ionlari miqdori 0–2 g/l hamda bo'tanadagi qattiq zarrachalar miqdori 50–200 g/l diapazonda o'zgartirildi. Tajribalar davomiyligi 24 soat etib belgilandi. Tajribalar analitik darajadagi reagentlar va distillangan suv asosida tayyorlangan eritmalar yordamida amalga oshirildi. Tadqiqotda qo'llanilgan asosiy kimyoviy reagentlar hamda ularning tozalik darajalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Tadqiqotda foydalanilgan kimyoviy reagentlar ro'yxati

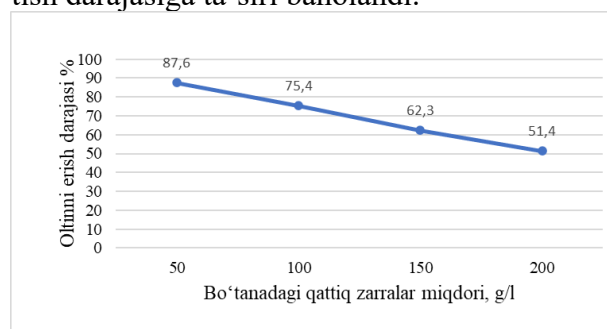
Reagent	Tozalik darajasi%
Glitsin	97%
Mis (II) sulfat pentagidrat	98%
Natriy gidroksid	97%
Marganes oksidi	99%

Oltinning eritmaga o'tish darajasini oshirish maqsadida dastlabki oksidlash jarayonlari ham o'rganildi. Ushbu bosqichda marganes oksidi kuchli oksidlovchi reagent sifatida qo'llanilib, uning konsentratsiyasi 0–2 g/l oralig'ida tanlandi. Jarayon davomida pH qiymati 10,5 atrofida ushlab turildi.

Tajriba natijalarini baholashda oltinning eritmaga ajralish darajasi, reagentlar sarfi va texnologik parametrlarning jarayon samaradorligiga ta'siri aniqlandi. Olingan ma'lumotlar asosida glitsinli eritish jarayonining optimal sharoitlari baholandi hamda texnologik samaradorlik tahlil qilindi.

Natijalar va ularning muhokamasi.

Tadqiqot natijalari Marjonbuloq koni boyitish chiqindilaridan oltinni glitsin asosida tanlab eritish jarayonining samaradorligi texnologik parametrlar bilan chambarchas bog'liqligini ko'rsatdi. Tajribalar davomida bo'tanadagi qattiq zarrachalar miqdori, glitsin konsentratsiyasi, Cu^{2+} ionlari miqdori hamda marganes oksidi ishtirokidagi dastlabki oksidlash jarayonining oltinning eritmaga o'tish darajasiga ta'siri baholandi.

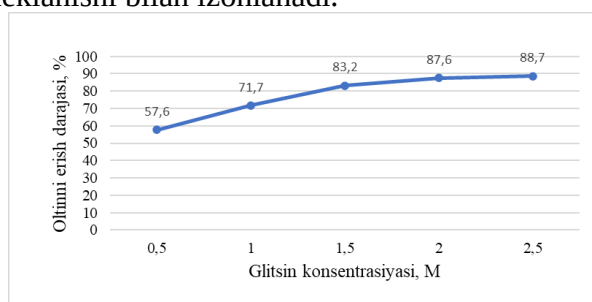


2-rasm. Bo'tanadagi qattiq zarrachalar miqdorining oltinning eritmaga o'tish darajasiga ta'siri.

Dastlab bo'tanadagi qattiq zarrachalar miqdorining jarayon samaradorligiga ta'siri o'rganildi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, qattiq faza miqdori oshishi bilan oltinning eritmaga o'tish darajasi kamayishi kuzatildi. Eng yuqori natija 50

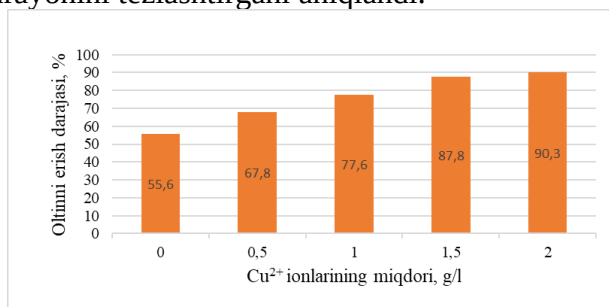
g/l qattiq faza miqdorida qayd etilib, bunda oltinning eritmaga ajralish darajasi 87,6 % ni tashkil etdi. Qattiq faza miqdorining ortishi eritmaning qovushqoqligini oshirib, reagentlarning mineral yuzasiga ta'sirini cheklashi bilan izohlanadi.

Keyingi bosqichda glitsin konsentratsiyasining jarayon samaradorligiga ta'siri tadqiq qilindi. Natijalar glitsin konsentratsiyasi oshishi bilan oltinning eritmaga o'tish darajasi ham ortishini ko'rsatdi. Ayniqsa, 1,5–2,0 M oralig'ida eritish samaradorligi keskin oshganligi kuzatildi. Biroq konsentratsiyaning keyingi ortishi sezilarli natija bermadi. Bu holat eritmada yetarli miqdorda kompleks hosil qiluvchi reagent mavjud bo'lgandan keyin jarayon kinetikasi boshqa omillar bilan cheklanishi bilan izohlanadi.



3-rasm. Glitsin konsentratsiyasining oltinning eritmaga o'tish darajasiga ta'siri.

Cu^{2+} ionlarining katalitik ta'sirini baholash maqsadida olib borilgan tajribalarda mis ionlari miqdori oshishi bilan oltinning eritmaga ajralish darajasi ham ortgani aniqlandi. Eng yuqori natijalar 1,5–2,0 g/l oralig'ida kuzatildi va oltinning eritmaga o'tish darajasi 90,3% gacha yetdi. Cu^{2+} ionlari oksidlanish-qaytarilish reaksiyalarini jadallashtirib, oltinning glitsin bilan kompleks hosil qilish jarayonini tezlashtirgani aniqlandi.

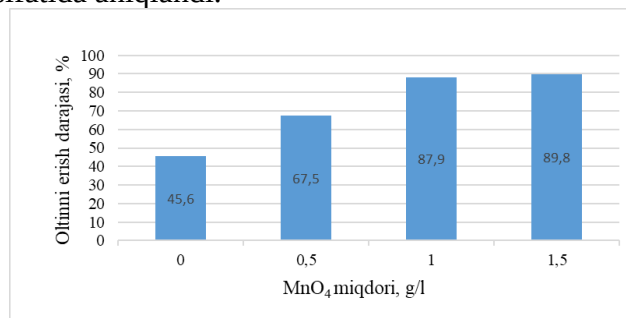


4-rasm. Cu^{2+} ionlari miqdorining oltinning eritmaga o'tish darajasiga ta'siri.

Marganes oksidi ishtirokidagi dastlabki

oksidlash jarayonlari ham oltinni eritishga sezilarli ta'sir ko'rsatdi. Tajriba natijalariga ko'ra, MnO_4 miqdori ortishi bilan oltinning eritmaga ajralish darajasi oshib borgan va 2 g/l da eng yuqori natija kuzatilgan. Bu marganes oksidining mineral yuzasini faollashtirishi hamda oltinning oksidlanish jarayonini jadallashtirishi bilan bog'liq.

Olingan natijalar glitsin asosidagi tanlab eritish texnologiyasi oltin saqllovchi texnogen chiqindilarni qayta ishlashda istiqbolli yo'nalish ekanligini ko'rsatdi. Jarayon uchun optimal sharoit sifatida glitsin konsentratsiyasi 1,5–2,0 M, Cu^{2+} ionlari miqdori 1,5–2,0 g/l hamda bo'tanadagi qattiq faza miqdori 50 g/l deb baholandi. Marganes oksidi yordamida dastlabki oksidlash esa oltinning eritmaga o'tish darajasini oshirishda samarali omil sifatida aniqlandi.



5-rasm. Marganes oksidi miqdorining oltinning eritmaga o'tish darajasiga ta'siri.

Xulosa. Tadqiqot natijalari Marjonbuloq koni boyitish chiqindilaridan oltinni glitsin asosida tanlab eritish texnologiyasi samarali va ekologik xavfsiz usul ekanligini ko'rsatdi. Tajribalar davomida glitsin konsentratsiyasi, Cu^{2+} ionlari miqdori, bo'tanadagi qattiq zarrachalar konsentratsiyasi hamda marganes oksidi yordamidagi dastlabki oksidlash jarayonining oltinning eritmaga o'tish darajasiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlandi. Ayniqsa, glitsin konsentratsiyasi 1,5–2,0 M, Cu^{2+} ionlari miqdori 1,5–2,0 g/l va qattiq faza miqdori 50 g/l bo'lgan sharoitlarda yuqori texnologik samaradorlik kuzatildi.

Tadqiqotlar natijasida optimal sharoitlarda oltinning eritmaga o'tish darajasi 90,3 % gacha yetishi aniqlandi. Marganes oksidi yordamidagi dastlabki oksidlash oltinning erish jarayonini jadallashtirib, glitsinli tizimning samaradorligini oshirishi tasdiqlandi. Olingan natijalar glitsin asosidagi tanlab eritish texnologiyasi oltin saqllovchi

texnogen chiqindilarni qayta ishlashda sianlash | muqobil texnologiya ekanligini ko'rsatdi.
usuliga nisbatan ekologik xavfsiz va istiqbolli

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Sanaqulov Q.S., Xasanov A.S. Konchilik chiqindilarini qayta ishlashda ekologik xavfsiz texnologiyalar. // O'zbekiston konchilik jurnali, 2020, №2, 33–41-betlar.
- [2] Mo'minov A.A., Yusupov X.Z. Oltin saqllovchi rudalarni gidrometallurgik qayta ishlash texnologiyalari. – Toshkent: Fan, 2019. – 145–152-betlar.
- [3] Oraby, E.A., Eksteen, J.J. The effect of glycine concentration and alkaline conditions on gold leaching. Minerals Engineering, 2015, Vol. 70, pp. 188–195.
- [4] Oraby, E.A., et al. Enhanced gold extraction from oxide ores using potassium permanganate in glycine leaching systems. Hydrometallurgy, 2020, Vol. 193, pp. 105–114.
- [5] Aylmore, M.G. Alternative lixiviants to cyanide for leaching gold ores. Minerals Engineering, 2016, Vol. 87, pp. 1–13.
- [6] Botirovich, X. J. N., Mamarasulovich, R. Z. U. B., & Odilo'G'Li, I. B. (2025). "NKMK" AJ "AUMINZO-AMANTOY" KONI OLTIN AJRATISH SEXI TEXNOGEN CHIQINDILARINI TADQIQ QILISH. Sanoatda raqamli texnologiyalar/Цифровые технологии в промышленности, 3(4), 124-128.
- [7] Qayumov, O., Ro'ziyev, U. B., & Abdullayev, F. (2026). METALLURGIK TEXNOGEN CHIQINDILARDAN KAMYOB METALLARNI AJRATIB OLIISH TEXNOLOGIYASI. MUHANDISLIK VA IQTISODIYOT, 4(1).

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Rahmonova, U. T., Xasanov, A. S., & Saidaxmedov, A. A. (2026). Glitsinli eritmalarida oltinning erish kinetikasi va texnologik parametrlarini tadqiq qilish. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.2>

UO‘K: 669.187.4

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.1

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

RUX SAQLOVCHI YOYLI PO‘LAT ERITISH PECHI CHANGINING TAVSIFI VA QAYTA ISHLASH IMKONIYATLARI TAHLILI



**Jalolov Baxtiyorjon
Adxamjon o'g'li**

Doktorant, Olmaliq davlat texnika
institut, Olmaliq, O'zbekiston
E-mail:

jalolovbaxtiyorjon319@gmail.com

ORCID ID: 0009-0004-3736-3056

Science ID: MTV-0525-0016



**Mirzavaliyev Doston
Boxodirovich**

Xalqaro hamkorlik bo'limi
boshlig'i, t.f.f.d. (PhD), Olmaliq
davlat texnika instituti, Olmaliq,
O'zbekiston

E-mail: 5515414d@gmail.com

ORCID ID: 0009-0006-1612-7083

Science ID: MTV-0625-0020



**Qarshiyev Humoyun
Komilovich**

Katta o'qituvchi, Olmaliq davlat
texnika instituti, Olmaliq,
O'zbekiston

E-mail: qarshiyev0409@gmail.com

ORCID ID: 0009-0003-6457-8266

Science ID: MSN-0525-0036



**Kamalova Iroda
Mamasaid qizi**

Magistrant, Olmaliq davlat texnika
institut, Olmaliq, O'zbekiston
E-mail:

irodaashirmatova14@gmail.com

ORCID ID: 0009-0008-0245-3827

Science ID: MTV-1225-0072

Annotatsiya. Mazkur maqolada metallolom asosida po‘lat ishlab chiqarish jarayonida hosil bo‘ladigan yoyli po‘lat eritish pechi changining (YPEP) fizik-kimyoviy xususiyatlari hamda undan ruxni qayta tiklash imkoniyatlari o‘rganilgan. Tadqiqot obyekti sifatida “LI DA METAL TECHNOLOGY” MCHJ korxonasidan olingan chang namunalari tanlangan. Namunalarning kimyoviy tarkibi va morfologik xususiyatlari rentgen-fluorescent tahlil (XRF), energiya-dispersiv rentgen spektroskopiyasi (EDS/SEM) hamda lazerli zarracha o‘lchamini aniqlash usullari yordamida baholandi. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, chang tarkibida temir oksidi va rux oksidi asosiy komponentlar bo‘lib, mos ravishda 40,7% va 15,2% ni tashkil etishi aniqlandi. Shuningdek, natriy, kalsiy, kremniy, kaliy, oltingugurt, marganets va qo‘rg‘oshin oksidlari ham sezilarli miqdorda mavjudligi qayd etildi. EDS tahlili temir, rux va kislorod elementlarining ustunligini tasdiqladi, zarrachalar o‘lchami tahlili esa changning mayda dispers tuzilishga ega ekanligini ($D_{50}=11,455 \mu\text{m}$, $D_{90}=34,573 \mu\text{m}$) ko‘rsatdi. Tarkibdagi rux miqdorining yuqoriligi ushbu chiqindini qimmatli ikkilamchi xomashyo sifatida qayta ishlash imkoniyatini ko‘rsatadi. Natijalar asosida ruxni ajratib olish uchun Vels pechi asosidagi pirometallurgik hamda sulfat kislotali eritish asosidagi gidrometallurgik texnologiyalar istiqbolli yo‘nalishlar sifatida tavsiya etildi. Olingan natijalar metallurgiya sanoatida xavfli chiqindilarni samarali boshqarish, qimmatli metallarni qayta tiklash va aylanma iqtisodiyot tamoyillarini rivojlantirish uchun ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: yoyli po‘lat eritish pechi changi, YPEP, rux oksidi, temir oksidi, XRF tahlili, EDS/SEM, zarracha o‘lchami, gidrometallurgik qayta ishlash, pirometallurgik qayta ishlash, Vels pechi, ikkilamchi resurslar, xavfli chiqindilar, aylanma iqtisodiyot.

Received: 01.07.2026

Accepted: 07.07.2026

Issue publication: 28.09.2026

ХАРАКТЕРИСТИКА И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЦИНКСОДЕРЖАЩЕЙ ПЫЛИ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

**Жалолов
Бахтиёржон
Адхамжон угли**

Докторант, Алмалыкский
государственный технический
институт, Алмалык, Узбекистан

**Мирзалиев Достон
Бахадырович**

PhD, начальник отдела
международного
сотрудничества Алмалыкского
государственного технического
института, Алмалык,
Узбекистан

**Каршиев Хумоюн
Комилович**

Старший преподаватель,
Алмалыкский государственный
технический институт,
Алмалык, Узбекистан

**Камалова Ирода
Мамасаид кизи**

Магистрант, Алмалыкский
государственный технический
институт, Алмалык, Узбекистан

Аннотация. В статье представлены результаты исследования физико-химических свойств пыли электродуговой сталеплавильной печи (ПЭДСП), образующейся при производстве стали из металлического лома, а также оценена возможность извлечения из нее цинка. Объектом исследования служили образцы пыли, полученные на предприятии ООО «LI DA METAL TECHNOLOGY». Химический состав, морфология и гранулометрические характеристики образцов исследованы методами рентгенофлуоресцентного анализа (XRF), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS/SEM) и лазерной дифракции частиц. По результатам XRF установлено, что основными компонентами пыли являются оксид железа (40,7 %) и оксид цинка (15,2 %), а также оксиды натрия, кальция, кремния, калия, серы, марганца и свинца. Анализ EDS подтвердил преобладание в составе железа, цинка и кислорода, а исследование распределения размеров частиц показало мелкодисперсную структуру материала со значениями $D_{50} = 11,455$ мкм и $D_{90} = 34,573$ мкм. Высокое содержание цинка свидетельствует о значительном потенциале использования данной пыли в качестве вторичного сырья. В качестве наиболее перспективных направлений переработки рассмотрены пирометаллургическая технология с применением процесса Вельца и гидрометаллургическое выщелачивание серной кислотой. Полученные результаты могут служить научной основой для рационального управления опасными металлургическими отходами, извлечения ценных компонентов и развития принципов циркулярной экономики.

Ключевые слова: пыль электродуговой сталеплавильной печи, ПЭДСП, оксид цинка, оксид железа, рентгенофлуоресцентный анализ, EDS/SEM, гранулометрический состав, гидрометаллургическая переработка, пирометаллургическая переработка, процесс Вельца, вторичные ресурсы, опасные отходы, циркулярная экономика.

CHARACTERISTICS AND ANALYSIS OF PROCESSING OPTIONS FOR ZINC-BEARING DUST FROM ELECTRIC ARC FURNACES

**Jalolov Bakhtiyorjon
Adkhamjon ugli**

Doctoral Student, Almalik State
Technical Institute, Almalik,
Uzbekistan

**Mirzavaliyev Doston
Bokhodirovich**

PhD, Head of the International
Cooperation Department, Almalik
State Technical Institute, Almalik,
Uzbekistan

**Karshiyev Khumoyun
Komilovich**

Senior Lecturer, Almalik State
Technical Institute, Almalik,
Uzbekistan

**Kamalova Iroda
Mamasaid kizi**

Master's Student, Almalik State
Technical Institute, Almalik,
Uzbekistan

Abstract. This paper presents the results of a comprehensive investigation into the physicochemical properties of electric arc furnace dust (EAFD), generated during steel production from scrap metal, with particular emphasis on its potential for zinc recovery. Dust samples collected from LI DA METAL TECHNOLOGY LLC were selected as the research material. The chemical composition, morphology, and particle size distribution of the samples were characterized using X-ray fluorescence (XRF), energy-dispersive X-ray spectroscopy coupled with scanning electron microscopy (EDS/SEM), and laser diffraction particle size analysis. XRF analysis revealed that the dust mainly consists of iron oxide (40.7 wt.%) and zinc oxide (15.2 wt.%), together with sodium, calcium, silicon, potassium, sulfur, manganese, and lead oxides. EDS results confirmed the predominance of iron, zinc, and oxygen, while particle size analysis indicated a fine-grained material with median and 90th percentile particle diameters of

D50=11.455 μm and D90=34.573 μm , respectively. The elevated zinc content demonstrates the significant potential of EAFD as a valuable secondary raw material for resource recovery. Among the most promising recycling technologies are pyrometallurgical processing using the Waelz process and hydrometallurgical sulfuric acid leaching. The obtained results provide a scientific basis for the sustainable management of hazardous metallurgical waste, recovery of valuable metals, and implementation of circular economy principles in the steel industry.

Keywords: electric arc furnace dust (EAFD), zinc recovery, iron oxide, X-ray fluorescence (XRF), EDS/SEM characterization, particle size distribution, hydrometallurgical processing, pyrometallurgical processing, Waelz process, secondary resources, hazardous waste, circular economy.

Kirish. Jahon po'lat sanoati muhim tarkibiy o'zgarishlar davrini boshdan kechirmoqda: yoyli po'lat eritish pech (YPEP) texnologiyasi qayta ishlangan metallom bilan mosligi va domna pechlariga nisbatan karbonat angidrid (CO_2) gazining pastligi tufayli jadal kengayib bormoqda. 2024-yilda dunyo bo'yicha YPEP asosida po'lat ishlab chiqarish 548,4 million tonnani tashkil etdi. Bu umumiy hajmi 1,885 milliard tonna bo'lgan jahon xom po'lati ishlab chiqarishining 29,1 foizidir (2023-yilda bu ko'rsatkich 28,6 foiz edi). Amerika Qo'shma Shtatlari kabi yirik po'lat ishlab chiqaruvchi mamlakatlarda umumiy po'lat ishlab chiqarishning 71,8 foizi, Yevropa Ittifoqida esa 44,4 foizi elektr yoyli pechlar hissasiga to'g'ri keladi [1].

Yoyli po'lat eritish pechi changlari (YPEP) gaz tozalash filtrlash tizimlari yordamida ushlab qolinadi. Bir tonna xomaki po'lat ishlab chiqarishda taxminan 10-20 kg chang hosil bo'ladi. Dunyo bo'yicha YPEP usulida po'lat eritish hajmini hisobga olsak, har yili hosil bo'ladigan YPEP chang miqdori kamida 5-10 million tonnani tashkil etadi va bu ko'rsatkich 2050-yilga kelib yiliga 18 million tonnagacha oshishi taxmin qilinmoqda. Shunga muvofiq, 2024-yilda taxminan 1,98 milliard AQSh dollariga baholangan YPEP changini qayta ishlash global bozorining yillik o'rtacha 4,3% o'sish sur'ati bilan 2034-yilga borib 3,11 milliard AQSh dollariga yetishi kutilmoqda [3, 4, 5, 6].

YPEP changi tarkibida eruvchan shakldagi zaharli va ekotoksik og'ir metallar - xususan, qo'rg'oshin (Pb), kadmiy (Cd), xrom (Cr) va rux (Zn) mavjudligi sababli ko'plab hujjatlarda xavfli chiqindi sifatida tasniflanadi. Amerika Qo'shma Shtatlari Atrof-muhitni muhofaza qilish agentligi (EPA) tizimida YPEP changi K061 belgisi bilan yuritilsa, Yevropa chiqindilar to'g'risidagi qonunchiligida po'lat ishlab chiqarishning xavfli qoldiqlari uchun mo'ljallangan kodlar ostida

tasniflanadi. Asosan rux ferriti (ZnFe_2O_4 , franklinit), magnetit (Fe_3O_4), sinkit (ZnO) hamda turli xloridlar va sulfatlardan iborat changning murakkab mineralogiyasi an'anaviy utilizatsiya usullarini ekologik jihatdan nomaqbul va iqtisodiy tomondan samarasiz qilib qo'yadi [2, 7, 8, 9].

Yoyli po'lat eritish pechi changi xavfli chiqindi maqomiga ega bo'lishiga qaramay, uning metallarga boy tarkibi - xususan, odatiy tarkiblarda 10-35% rux, 18-40% temir, 1-6% qo'rg'oshin va 3-4% kalsiy mavjudligi - uni qimmatbaho ikkilamchi xomashyoga aylantiradi. Hozirda dunyo bo'ylab hosil bo'ladigan YPEP changining taxminan 45 foizigina qayta ishlanadi, bu esa qayta tiklash salohiyati va amaldagi holat o'rtasida jiddiy tafovut borligini ko'rsatadi. Bu tafovut, ayniqsa, me'yoriy-huquqiy baza va qayta ishlash infratuzilmasi unchalik rivojlanmagan sanoatlashayotgan mintaqalarda yaqqol ko'zga tashlanadi [4, 10].

Ushbu tadqiqotning asosiy vazifalari quyidagilardan iborat: (1) XRF, EDS/SEM va lazer zarrachalar o'lchami tahlili yordamida sanoat manbalaridan olingan YPEP changi namunasining ko'p usulli fizik-kimyoviy tavsifini o'tkazish; (2) ruxni ajratib olish uchun muhim bo'lgan asosiy mineralogik va elementar xususiyatlarni aniqlash; va (3) resurslarni barqaror ajratib olishni ko'zlab, ushbu aniq chang tarkibini qayta ishlash uchun mavjud qayta ishlash texnologiyalarining - birinchi navbatda Vels pirometallurgik jarayoni va sulfat kislotali gidrometallurgik tanlab eritishning - yaroqliligini tanqidiy baholash.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. YPEP changining kimyoviy va mineralogik tarkibi. YPEP changi tarkibi metallolom (chiqindi) yuklamasi, pechning ishlash rejimi va ishlab chiqarilayotgan qotishmalar turiga qarab sezilarli darajada o'zgarib turadi. Shunga qaramay, ko'plab tadqiqotlar natijalarida asosiy metall komponentlar

sifatida temir va ruxning birgalikdagi ustunligi qayd etilgan. Uglerodli po'lat ishlab chiqarishdan olingan odatiy YPEP chang tarkibida 18-40% temir, 10-35% rux, 1-6% qo'rg'oshin, 3-4% kalsiy, 0,4-0,5% alyuminiy, 0,02-0,9% kadmiy hamda oz miqdorda margimush, xrom va nikel mavjud bo'ladi [7, 8, 10].

YPEP chang tarkibidagi ruxning mineralogik shakllari (spetsiatsiyasi) qayta ishlash usulini tanlashda juda muhim ahamiyatga ega. Rux asosan suyultirilgan kislotalarda ham, ishqorlarda ham erimaydigan, termodinamik barqaror shpinel fazasi bo'lgan rux ferriti ($ZnFe_2O_4$, franklinit) ko'rinishida uchraydi. Shuningdek, rux erkin sinkit (ZnO) va kamroq miqdorda rux xlorid ($ZnCl_2$) shaklida ham mavjud. Asosiy temir saqlovchi fazalar magnetit (Fe_3O_4), magnesioferrit ($MgFe_2O_4$) va kalsiy bilan almashingan ferritlardir. Qo'shimcha fazalarga Mn_3O_4 , $FeCr_2O_4$, MgO , SiO_2 va $NaCl$ kiradi [2, 9].

XRD va SEM-EDS yordamida o'tkazilgan tadqiqotlar shuni tasdiqlaydiki, $ZnFe_2O_4$ fazasi odatiy YPEP changdagi umumiy ruxning yarmidan ko'pini tashkil etadi, bu esa uning parchalanishini ruxni samarali ajratib olishning zaruriy shartiga aylantiradi. Ko'pchilik zarrachalarning mayda, sferik morfologiyasi - ayniqsa 20 mkm dan past bo'lgan zarrachalar - pechning ishlash jarayonida gaz fazasidan kondensatsiyalanishga mos keladi. 20 mkm dan yuqori bo'lgan shlakdan olingan yirik zarrachalar noto'g'ri morfologiyani ko'rsatadi va asosan temirga boy fazalarni o'z ichiga oladi.

Fizik xususiyatlar va zarrachalar o'lchami.

YPEP changida o'ta mayda donali materialdir. Ko'plab tadqiqotlar shuni tasdiqlaydiki, zarrachalarning 80-90% hajmi 10-26 mkm dan kichikdir. Machado va boshqalar zarrachalarning o'rtacha diametri 1,88 mkm, 60% zarrachalar esa 0,90 dan 4,30 mkm gacha ekanligini ma'lum qilishdi. Trifunovich va boshqalar tomonidan o'tkazilgan granulometrik tahlil shuni ko'rsatdiki, zarrachalarning 80 foizi 26 mkm dan kichik. Ushbu o'ta mayda chang o'lchami qayta ishlash (masalan, issiqlik bilan ishlov berish paytida gaz oqimlarida tortish) va atrof-muhitni boshqarish (masalan, ochiq saqlash paytida shamol tarqalishi) uchun o'ziga xos muhandislik muammolarini keltirib chiqaradi [2].

Skannerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida olingan tasvirlarda submikron zarrachalarning asosan sharsimon shaklga ega ekanligi ko'rinadi - bu sovish jarayonidagi bug'

kondensatsiyasiga mos keladi. Kattaroq bo'laklar esa sachrash va shlak qo'shilmalari hosil bo'lishi mexanizmlari natijasida vujudga kelib, burchaksimon yoki noto'g'ri shakllarga ega bo'ladi. Energiya-dispersiyali rentgen spektroskopiyasi (EDS) xaritalash natijalari shuni tasdiqlaydiki, mayda sharsimon zarrachalar asosan rux va temirdan tashkil topib, $ZnFe_2O_4$ fazasiga to'g'ri keladi, yirikroq zarrachalarda esa elementlarning ancha notekis (geterogen) taqsimlanishi kuzatiladi [9, 12, 13].

Ekologik oqibatlar. YPEP changining xavflilik tasnifi asosan uning tarkibidagi og'ir metallarning atrof-muhit sharoitida yuviluvchanligidan kelib chiqadi. Toksiklik xususiyatini aniqlash uchun yuvish usuli (TCLP) qayta ishlanmagan YPEP changdan olingan yuvindi suvlarda rux (Zn), qo'rg'oshin (Pb) va kadmiy (Cd) miqdori belgilangan me'yorlardan doimiy ravishda yuqori ekanligini ko'rsatadi. Xrom tarkibi esa, ayniqsa Cr(III) moddasining Cr(VI) ga aylanishi mumkin bo'lgan oksidlovchi muhitlarda, qo'shimcha kanserogen xavflarni yuzaga keltiradi. Ko'plab rivojlanayotgan sanoat hududlarida kuzatilganidek, noto'g'ri sharoitlarda saqlanganida yog'ingarchilik og'ir metallarning yerosti suvlariga aralashishiga olib kelishi mumkin, bu esa uzoq muddatli ekologik buzulishlarni yuzaga keltiradi [2, 7, 16].

Qayta ishlash texnologiyalari.

Pirometallurgik usullar: Vels pechi jarayoni YPEP changni qayta ishlashning asosiy sanoat texnologiyasi hisoblanib, dunyo bo'yicha qayta ishlangan fraksiyaning asosiy qismini tashkil etadi. Bu jarayonda YPEP changi qattiq qaytaruvchi (koks yoki ko'mir) hamda ohak yoki kremniy dioksidi bilan aralashtiriladi, donadorlanadi va taxminan 1000-1200 °C gacha qizdiriladigan aylanma pechga beriladi. Bunday sharoitda ZnO va $ZnFe_2O_4$ karbotermik yo'l bilan metall ruxgacha qaytariladi. U esa o'z navbatida bug'lanadi va tutun gazlar zonasida qayta oksidlanib, tarkibida taxminan 55% Zn va 10% gacha Pb bo'lgan xomaki rux oksidi (Vels oksidi) hosil qiladi. Keyinchalik Vels oksidi rux eritish zavodlarida xomashyo sifatida qo'llaniladi. Vels jarayoni optimallashtirilgan sharoitlarda (1100 °C, 90 daqiqa) ruxni 98,6% gacha ajratib olish imkonini beradi. Bunda donadorlangan xomashyo g'ovaklik va issiqlik o'tkazuvchanlikning yaxshilanganligi tufayli kukun

shaklidagidan yuqori samaradorlik ko'rsatadi [15, 17, 18, 19].

2010-yilda Tayvanda tijoratlashtirilgan elektr eritish reduksiyasi pechi (ESRF) jarayoni yuqori energiya xarajatlariga qaramay, shlakni bir vaqtning o'zida zararsizlantirish bilan deyarli to'liq rux va temirni qayta ishlashni taklif etadi. Yaqinda kislorod yordamida xlrlash ruxni xlrlash samaradorligi 97% dan oshishini, temirni xlrlash esa 1% dan past bo'lishini ko'rsatdi, bu esa ruxni tanlab ajratishga imkon beradi [10].

Gidrometallurgik usullar: YPEP changini gidrometallurgik ishlov berish odatda temirni asosan qattiq qoldiqda qoldirib, rux va boshqa rangli metallarni eritish uchun sulfat kislotada (H_2SO_4) ishqorlashni o'z ichiga oladi. Atmosfera bosimida, $25^\circ C$ haroratda 1 N H_2SO_4 eritmasi yordamida ruxni 85% ajratib olish mumkinligi isbotlangan. Yuqori bosimda ishqorlash (2 M H_2SO_4 , $270^\circ C$) orqali ruxni ajratib olish darajasi 53-79% ga, kislotada konsentratsiyasi yuqori bo'lgan atmosfera sharoitida ishqorlashda (4 M H_2SO_4) esa 97% gacha yetadi. Asosiy muammo $ZnFe_2O_4$ birikmasining kimyoviy barqarorligidir, chunki u yumshoq ishqorlash sharoitida erishga chidamli. Kuydirish, termik parchalash yoki xlrlash orqali dastlabki ishlov berish bu fazadan ruxning ajralib chiqishini sezilarli darajada yaxshilaydi [10, 21, 22, 23].

Ikki bosqichli yondashuv - eruvchan xloridlar va sulfatlarni yuvib tashlash uchun dastlabki suv bilan yuvish, so'ngra sulfat kislotada bilan ishqorlash - reagent sarfini kamaytiradi va keyingi jarayonlarni soddalashtiradi. Ishqorlashdan so'ng, rux eritmadan erituvchi ekstraksiyasi, kimyoviy cho'ktirish yoki elektr eritish orqali qaytariladi, bu esa rux sulfat yoki yuqori tozalikdagi metall ruxni beradi [3].

Barqarorlashtirish/Qattiqlashtirish (B/Q): Metallarni qayta ishlash iqtisodiy jihatdan samarasiz bo'lgan hollarda, MgO bog'lovchilar bilan yoki ularsiz qo'llaniladigan portlandsement og'ir metallarni harakatsizlantirib, TCLP bo'yicha yuvilish darajasini maqbul ko'rsatkichgacha pasaytirishi mumkin. Bu esa hosil bo'lgan qoldiqlarni poligonlarda xavfsiz utilizatsiya qilish imkonini beradi. Biroq, bu usul chang tarkibidagi qimmatli moddalarni ajratib olishga imkon bermaydi va katta hajmdagi qotirilgan chiqindilarni hosil qiladi [25].

Mualliflar [26] rux keklari tarkibida rux ferriti, rux silikati va rux sulfidi kabi qiyin eriydigan

fazalar mavjudligi sababli an'anaviy tanlab eritishda ruxning to'liq eritmaga o'tmasligini ko'rsatib, jahon amaliyotida qo'llaniladigan getit, yarozit va gematit jarayonlarini o'zaro solishtirganlar. Tadqiqot natijalariga ko'ra, sulfat kislotada ishtirokida gidrometallurgik qayta ishlash rux, mis va kadmiy kabi komponentlarni yuqori darajada eritmaga o'tkazish, rux sulfat eritmasini zavodning mavjud elektroliz jarayoniga qaytarish hamda texnogen chiqindidan qo'shimcha metall ajratib olishni amalda isbotlab berishgan.

Namunalarni olish va tayyorlash. YPEP chang namunalari sanoat po'lat eritish korxonasining qop-filtrli chang yig'ish tizimidan olindi. Namunalar namlikni yutish va ifloslanishning oldini olish uchun yopiq polietilen idishlarda saqlangan. Har bir tahlil usuli uchun to'rtga bo'lib, keyin gomogenizatsiya qilish orqali reprezentativ kichik namunalar tayyorlandi.

Kimyoviy tarkib tahlili (XRF). Namunalarning umumiy kimyoviy tarkibi rentgen-fluorescent spektrometriyasi (XRF) yordamida aniqlandi (NEX CG asbobi, sochilishni tuzatishga ega fundamental parametrlar (FP) usuli). Namunalar presslangan tabletkalar ko'rinishida tahlil qilindi. Natijalar asosiy elementlar uchun oksidlarining massa ulushi (%), kichik va mikroelementlar uchun esa elementlarning massa ulushi (%) sifatida keltirilgan. Takroriy o'lchovlar tahlilning qaytariluvchanligini tasdiqladi; bunda asosiy oksidlar uchun statistik xatolik (2σ) doimiy ravishda 0,5% mass. dan past bo'ldi.

Elementlarning taqsimlanish xaritasi va mikrostruktura tahlili (SEM-EDS). Energiya-dispersli rentgen spektroskopiyasi bilan birgalikdagi skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM-EDS) tahlili uglerod bilan qoplangan namunalar ustida $2050\times$ kattalashtirishda o'tkazildi. Bunda Fe, Zn, Ca, Mn, Si, K, Na va mavjud bo'lgan boshqa elementlarning K-seriyali va $K\beta$ -seriyali rentgen nurlarini uyg'otish uchun mos keladigan tezlatuvchi kuchlanish qo'llanildi. Elementlarning miqdoriy tahlili standart ZAF matritsasini tuzatish usuli yordamida bajarilib, natijalar atom ulushi (%), massa ulushi (%) va tegishli xatoliklar ko'rinishida taqdim etildi.

Zarrachalar o'lchamining taqsimlanishini tahlil qilish. Zarrachalar o'lchamining lazerli tahlili JL-1197 rusumli lazerli zarrachalar o'lchami

analizatorida (Chengdu Jingxin Powder Analyse Instrument Co., Ltd.) dispersant muhit sifatida suvdan foydalanilgan holda amalga oshirildi (nurni sindirish ko'rsatkichi: 1,33; namunaning nurni sindirish ko'rsatkichi: 1,54+0,01i). Kumulyativ va differensial hajmiy taqsimotlar aniqlanib, standart foizli parametrlar (D10, D25, D50, D75, D90, D97, D99) hamda o'rtacha hajmiy diametrlar (D, D) olindi. O'ltahov ishonchliligini ta'minlash uchun konsentratsiya 99,99% darajasida ushlab turildi.

Natijalar. Umumiy kimyoviy tarkibi (XRF). YPEP chang namunasining XRF tahlili uglerodli/legirlangan po'lat parchalari asosidagi YPEP changiga xos bo'lgan murakkab ko'p elementli tarkibga ega ekanligini ko'rsatdi. Natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

YPEP changi asosiy komponentlarining miqdori, %

Fe	Zn	Cl	Ca	Mn	Pb	Mg	Na	Al	K	SiO ₂	Cu	C	O
34.4	14.7	2.92	7.12	2.17	1.7	2.04	8.51	0.74	3.59	6.04	0.2	12.86	28.74

YPEP changining qolgan komponentlarining miqdori sezilarli emas, eng keng tarqalgan metallar orasida nikel, kadmiy, qalay, bariyni ajratib ko'rsatish mumkin.

O'ltahashda 1-rasmda keltirilgan difrakto-gramma olindi va 3-jadvalda fraksiyalar bo'yicha taqsimot keltirildi.

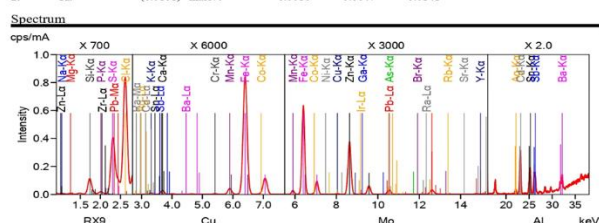
Asosiy faza hosil qiluvchi unsur temir bo'lib, u Fe₂O₃ holida 40,7% miqdorda mavjud. Bu esa pech ishlashi va chiqindi gazlarning sovishi davomida kuchli oksidlanish sodir bo'lganini ko'rsatadi. 15,2% miqdordagi ZnO ushbu namunaning ruxga boy YPEP changi ekanligini va ruxni ajratib olish uchun qayta ishlashga yaroqliligini tasdiqlaydi - Vels pechida iqtisodiy jihatdan samarali ishlov berish uchun chegara, odatda, umumiy Zn+Pb miqdori 15-20% dan yuqori deb hisoblanadi. Na₂O ning yuqori miqdori (9,93%) va Cl ning mavjudligi (2,60%) metallolom shixtasidan ishqoriy xloridlarning sezilarli darajada o'tganligini bildiradi, bu esa ruxlangan yoki qoplamali metallolomdan foydalanilganiga mos keladi. SO₃ ning yuqori miqdori (4,97 og'%) metallolom qoplamalari yoki texnologik qo'shimchalardan olingugurt qo'shilganini ko'rsatadi [10].

PbO ning 1,49% va CdO ning 0,081% miqdori ekologik nuqtai nazardan muhim ahamiyatga ega, chunki har ikkala elementning ham yuviluvchanligi bo'yicha qat'iy me'yoriy chegara-

lar mavjud. CuO (0,253%), ZrO₂ (0,223%), SnO₂ (0,054%) va Sb₂O₃ (0,039%) ning kichik konsentratsiyalari YPEP changning odatiy tarkibiga mos keladi va geterogen metallolomdan olinganini aks ettiradi.

Analyzed result (EP method, Scatter)

No.	Component	Result	Unit	Stat. Err.	LLD	LLQ
1	Cl	2.92	mass%	0.0033	0.0023	0.0070
2	Br	0.0265	mass%	0.0005	0.0006	0.0017
3	Na	8.51	mass%	0.359	0.945	2.84
4	Mg	2.04	mass%	0.0344	0.0505	0.152
5	Si	5.14	mass%	0.0101	0.0071	0.0213
6	P	0.0889	mass%	0.0019	0.0046	0.0137
7	S	2.18	mass%	0.0046	0.0080	0.0241
8	K	3.59	mass%	0.0248	0.0063	0.0190
9	Ca	7.12	mass%	0.0309	0.0185	0.0556
10	Cr	0.241	mass%	0.0024	0.0026	0.0077
11	Mn	2.17	mass%	0.0055	0.0058	0.0173
12	Fe	34.4	mass%	0.0071	0.0077	0.0232
13	Co	0.0686	mass%	0.0054	0.0181	0.0542
14	Ni	0.0249	mass%	0.0011	0.0022	0.0067
15	Cu	0.246	mass%	0.0026	0.0023	0.0070
16	Zn	14.7	mass%	0.0180	0.0015	0.0044
17	Ga	0.0259	mass%	0.0014	0.0038	0.0115
18	As	(0.0084)	mass%	0.0028	0.0081	0.0243
19	Rb	0.0236	mass%	0.0005	0.0009	0.0027
20	Sr	0.0107	mass%	0.0003	0.0006	0.0017
21	Zr	0.231	mass%	0.0029	0.0003	0.0010
22	Ag	0.0074	mass%	0.0005	0.0008	0.0025
23	Cd	0.0089	mass%	0.0016	0.0008	0.0025
24	Sn	0.0588	mass%	0.0012	0.0008	0.0024
25	Sb	0.0459	mass%	0.0012	0.0020	0.0060
26	Ba	0.0410	mass%	0.0016	0.0027	0.0081
27	Ir	0.0685	mass%	0.0030	0.0078	0.0235
28	Pb	1.70	mass%	0.0056	0.0019	0.0058
29	Ra	(0.0101)	mass%	0.0016	0.0047	0.0141



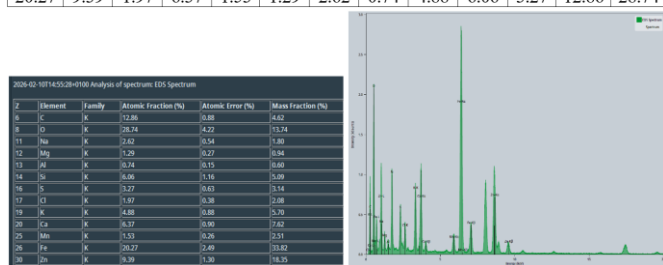
1-rasm. YPEP changining fazaviy tarkibi diagrammasi.

EDS bo'yicha elementar tarkibi. 2050× kattalashtirilgan SEM namunasining EDS tahlili zarrachalar darajasidagi fazoviy aniqlikda asosiy element tarkibini tasdiqladi. 2-jadvalda EDSning to'liq miqdoriy tahlili natijalari keltirilgan.

2-jadval

YPEP changi elementar tarkibi, %

Fe	Zn	Cl	Ca	Mn	Mg	Na	Al	K	Si	S	C	O
20.27	9.39	1.97	6.37	1.53	1.29	2.62	0.74	4.88	6.06	3.27	12.86	28.74



2-rasm. Chang zarrachalarining dispersiv rentgen spektroskopiyasi (EDS) spektri.

2-jadval va EDS spektri (2-rasm) tahliliga ko'ra, namunada temir (Fe), rux (Zn), kislorod (O) hamda nisbatan kam miqdorda kremniy (Si), kaltsiy (Ca), kaliy (K), oltingugurt (S), alyuminiy (Al), magniy (Mg), marganes (Mn), natriy (Na) va boshqa elementlar mavjudligi aniqlandi.

Spektrda ayniqsa Fe-Kα (~6.4 keV) va Zn-Kα

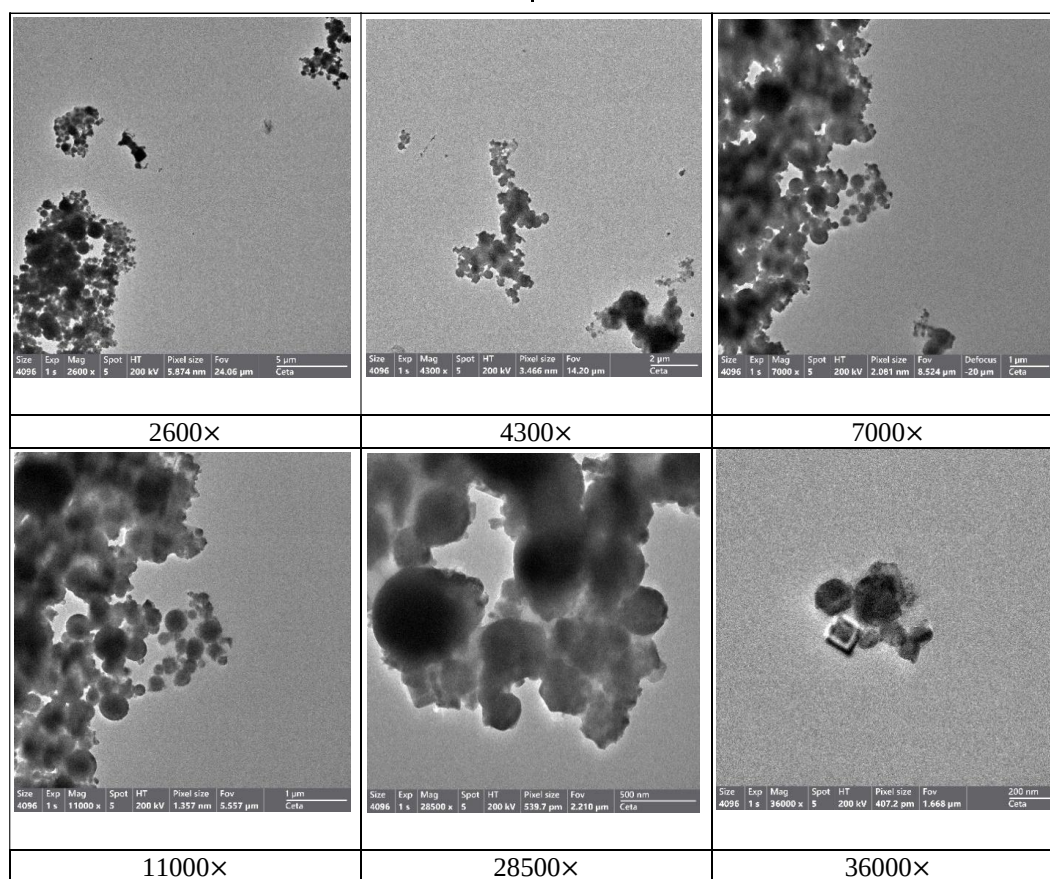
(~8.6 keV) piklarining yuqori intensivligi ushbu elementlarning namunadagi ustun komponentlar ekanligini ko'rsatadi. Kislorodning sezilarli miqdori esa ushbu elementlarning asosan oksid shaklida mavjudligini bildiradi.

EDS spektri Fe 33,82 % og'irlik ulushi bilan ustun metall elementi, Zn esa 18,35 % og'irlik ulushi bilan asosiy rangli metall ekanligini tasdiqlaydi. Uglerodning yuqori atom ulushi (12,86 %) metallolom yoki qisman yongan qaytaruvchilardan qolgan organik ifloslanishni aks ettiradi - bu sanoatda hosil bo'lgan YPEP changi uchun keng tarqalgan xususiyatdir. Tarkibdagi 28,74 % miqdoridagi kislorod asosan oksid fazali mineralogiya mos keladi [8, 13].

moslik xatoliklari ushbu asosiy elementlarning miqdoriy tahlili yuqori ishonchlilikka ega ekanini ko'rsatadi.

Yoyli po'lat eritish pechidan olingan chang namunalarning morfologik xususiyatlari TEM (Transmission Electron Microscopy) usuli yordamida turli kattalashtirish darajalarida (2600× dan 36000× gacha) o'rganildi.

TEM tasvirlari (3-rasm) chang zarrachalarining mikrostrukturaviy tuzilishini ochib berib, ularning asosan sferik shaklga ega bo'lgan nano va submikron o'lchamdagi zarrachalardan tashkil topganini ko'rsatdi. Yuqori kattalashtirishda ayrim zarrachalarning poligonal va kristall shaklga yaqin ko'rinishi aniqlandi. YPEP changi murakkab



3-rasm. Chang zarrachalarining TEM tasvirlari.

EDS spektridagi Fe-K α cho'qqisining ustunligi (intensivligi ~2,86 ming impuls) va sezilarli Zn-K α cho'qqisi (~1,08 ming impuls) XRF tahlilidagi massa ulushlarini bevosita aks ettiradi. Ca-K α , Si-K α , K-K α va Mn-K α cho'qqilari chang matritsasining ko'p elementli tabiatga ega ekanligini tasdiqlaydi. Fe (0,02%) va Zn (0,08%) uchun past

tarkibli, nano va mikro o'lchamdagi zarrachalardan iborat bo'lgan, kuchli aglomeratsiyalangan oksidli dispers tizim ekanligi aniqlandi.

Zarrachalar o'lchamining taqsimlanishi.

Lazer difraksiyasi tahlili YPEP chang namunasining sanoat changlariga xos bo'lgan bimodal-keng zarrachalar o'lchami taqsimotiga ega ekanligini

ko'rsatdi. Asosiy taqsimlanish parametrlari 3-jadvalda keltirilgan.

3-jadval

Zarrachalar o'lchamining taqsimlanish parametrlari (lazer difraksiyasi)

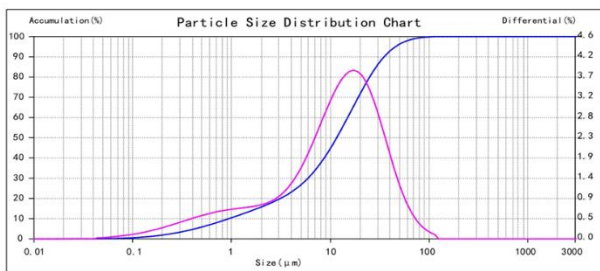
D6	D10	D16	D25	D50	D75	D84	D90	D97	D99	D	D	S/V ratio
0.507	0.933	2.031	4.502	11.455	21.494	27.791	34.573	52.971	71.206	15.428	2.036	2.9470

YPEP changi namunasi lazer difraksiyasi asosida ishlovchi zarracha o'lcham analizatori yordamida o'rganildi. Granulometrik tahlil natijalari changning keng diapazonda taqsimlanganligini ko'rsatdi. Median zarracha o'lchami $D_{50} \approx 11.455 \mu\text{m}$ bo'lib, asosiy massa o'rta o'lchamli fraksiyalarga to'g'ri keladi, $D_{90} \approx 34.573 \mu\text{m}$ qiymati esa yirik zarrachalar ulushining ham mavjudligini bildiradi. Shu bilan birga, $D[3,2] \approx 2.036 \mu\text{m}$ qiymati zarrachalarning sirt maydoni asosan mayda fraksiyalar hisobiga shakllanishini ko'rsatadi. Bu natijalar TEM tasvirlari bilan mos kelib, yirik zarrachalar aslida mayda nanozarrachalarning aglomeratsiyasi natijasida hosil bo'lganini tasdiqlaydi.



JL-1197 LASER PARTICLE SIZE ANALYSER REPORT

Sample name: Lida_mikro	0.275 μm	D6: 0.507 μm
Sample number: 1	D10: 0.933 μm	D16: 2.031 μm
Medium: R	D25: 4.502 μm	D50: 11.455 μm
Operating: Farrukh Erkinov	D75: 21.494 μm	D84: 27.791 μm
Concentration: 99.99	D90: 34.573 μm	D97: 52.971 μm
S/V: 2.9470 m ² /cm ³	D99: 71.206 μm	Model: General model_1
D[4,3]: 15.428 μm	D[3,2]: 2.036 μm	Sample analysis date: 1.54+ 0.01
date: 2026-2-13 16:00		Medium analysis date: 1.33



4-rasm. YPEP changining granulometrik tarkibi va zarracha o'lcham taqsimoti.

Granulometrik taqsimot egri chizig'i (4-rasm) asosan 10-20 μm diapazonda maksimum qiymatga ega bo'lib, bu interval chang massasining asosiy qismini tashkil etadi. Shu bilan birga, $<1 \mu\text{m}$ o'lchamli mayda zarrachalar va 30-50 μm dan katta yirik zarrachalarning mavjudligi changning ko'p fraksiyalari tizim ekanligini tasdiqlaydi.

Zarrachalarning median diametri (D_{50}) 11,455 μm bo'lib, bu ko'rsatkich adabiyotlarda sanoat YPEP changi uchun keltirilgan qiymatlarga mos keladi. Hajmiy o'rtacha qiymat ($D=15,428 \mu\text{m}$) va sirtiy o'rtacha qiymat ($D=2,036 \mu\text{m}$) o'rtasidagi

yaqqol farq taqsimotning keng va polidispers ekanligini, shuningdek, solishtirma sirt maydoniga nomutanosib ravishda katta hissa qo'shadigan submikron zarrachalar ulushi yuqori ekanligini ko'rsatadi. Solishtirma sirt-hajm nisbatining 2,9470 m^2/sm^3 ga tengligi sirt maydoni katta ekanligini tasdiqlaydi va bu ham ishqorlash, ham pirometallurgik jarayonlardagi reaksiya qobiliyatiga bevosita ta'sir qiladi [13, 14].

D_{90} ko'rsatkichining 34,573 μm bo'lishi zarrachalarning 90 foizi taxminan 35 μm dan kichik ekanligini bildiradi. Bu esa mazkur changni o'ta mayda dispersli toifaga kiritadi va texnologik gaz oqimlarida zarrachalarning ilashib ketishining oldini olish uchun Vels pechida qayta ishlashdan oldin pelletlashni taqozo etadi. Zarrachalarning sezilarli qismi 1 μm dan kichik ekanligi ($D_{10} = 0,933 \mu\text{m}$) tarkibida bug' kondensatsiyasi natijasida hosil bo'lishga xos bo'lgan nanoo'lchamdagi materiallar mavjudligidan dalolat beradi.

Muhokama. O'tkazilgan tahlillar natijalari ma'lumotlariga asosan, «LI DA METAL TECHNOLOGY» MCHJ YPEP changi ruxni ajratib olish uchun jiddiy texnik-iqtisodiy asosga ega bo'lgan qimmatbaho ikkilamchi xomashyo sifatida baholanadi. Ushbu changni qayta ishlash salohiyati quyidagicha baholanadi:

- **Rux miqdori (ZnO: 15,2%; elementar Zn: 18,35%)** Vels pechida iqtisodiy jihatdan samarali qayta ishlash uchun umumiy qabul qilingan 15 foizlik chegaradan yuqori [18].

- **Temir miqdori (Fe₂O₃: 40,7%, elementar Fe: 33,82%)** natriy karbonat ishtirokida eritib qaytarish usuli yordamida rux ajratib olingandan so'ng ikkilamchi temir konsentrati sifatida ahamiyatga ega bo'lishi uchun yetarlicha yuqori. Bu usul temirning 98,62 foizini ajratib olish va 93,8 foizlik temir olish imkonini beradi [26].

- **Qo'rg'oshin miqdori (PbO: 1,49%)** me'yoriy yuvilish cheklovlari sababli changni poligonga tashlash o'rniga unga ishlov berish zaruratini keltirib chiqaradi; Velslash jarayonida qo'rg'oshin rux bilan birga uchuvchanlik xususiyatiga ega bo'lib, oksidni tozalash bosqichida qayta tiklanadi yoki ajratib olinadi.

- **Ishqor va xloridlarning yuqori miqdori (Na₂O: 9,93%, Cl: 2,60%)** Velslash usulida qayta ishlashni murakkablashtiradi, chunki xloridlar pechning o'tga chidamli materiallariga shikast yetkazishi

va rux oksidi mahsulotini ifloslantirishi mumkin. Shu sababli, pirometallurgik ishlov berishdan oldin eruvchan xloridlarni yuvib tashlash uchun suv bilan oldindan tozalash qat'iy tavsiya etiladi [24].

- **Mayda zarrachalar o'lchami (D50: 11,455 μm)** sohadagi ilg'or tajribalarga muvofiq, Vels pechiga yuklashdan avval okatishlashni taqozo etadi [15].

- **Kadmiy (CdO: 0,081%) va xrom (Cr₂O₃: 0,301%)** atrof-muhit hamda salomatlik uchun xavf tug'diradi, bu esa materialni ochiq holda saqlash o'rniga, nazorat ostida qayta ishlash zaruratini kuchaytiradi [9, 16].

Natriy xlorid miqdori juda yuqori, zarrachalari nisbatan mayda va tarkibidagi rux ulushi 15 foizdan ortiq bo'lgan ushbu maxsus YPEP chang tarkibi uchun ikki bosqichli kompleks yondashuv tavsiya etiladi: (1) eruvchan Na, K, Cl va S fazalarini yo'qotish uchun dastlabki yuvish (bu yakuniy mahsulotlarning xlorid bilan ifloslanishini sezilarli darajada kamaytiradi); (2) rux va qo'rg'oshinni uchirib, xomaki rux oksidi shaklida qayta tiklash uchun yuvilgan va granulalangan qoldiqni Vels pechida qayta ishlash (bunda hosil bo'lgan temirli klinker metallurgiyada qayta ishlatilishi mumkin) [15, 18, 24].

Kichikroq hajmdagi yoki kam investitsiyali holatlar uchun 2-4 M H₂SO₄ bilan ishqorlashga asoslangan gidrometallurgik usul maqbul muqobil hisoblanadi. Bu usul ruxning 85-97 foizini ajratib olish imkonini beradi, temir esa asosan qattiq holda qolib, temir konsentrati sifatida ishlatilishi yoki YPEPga qaytarilishi mumkin. Ruxning asosiy fazasi sifatida ZnFe₂O₄ (franklinit) mavjudligi yumshoq sharoitlarda ekstraksiyani cheklaydi, shuning uchun kislota konsentratsiyasi, harorat (optimal 70-90°C) va reaksiya vaqtini (2-4 soat) optimallashtirish talab etiladi.

Istiqbolli texnologiyalar, xususan, kislorod yordamida xlorlash (>97% rux ajratib olish, <1% temir qo'shib ajralishi) va vodorod asosida to'g'ridan-to'g'ri qaytarish atrof-muhit uchun jiddiy afzalliklarni taqdim etsada, sanoatda joriy etishdan avval yanada kengaytirishni talab qiladi [11, 26].

Xulosa. Ushbu tadqiqotda po'lat qoldiqlari asosida ishlaydigan yoyli po'lat eritish pechi korxonasidan olingan sanoat changining (YPEP chang) batafsil, ko'p uslubli tavsifi keltirilgan bo'lib, uni qayta ishlash imkoniyatlari, ayniqsa, rux

va temirni ajratib olish nuqtayi nazaridan baholangan. Asosiy xulosalar quyidagilardan iborat:

1. Kimyoviy tarkibi: Rentgen-fluorescent tahlili (XRF) asosiy oksid fazalari Fe₂O₃ (40,7 %) va ZnO (15,2 %) ekanligini tasdiqladi. Shuningdek, tarkibida sezilarli miqdorda Na₂O (9,93 %), CaO (8,44 %), SiO₂ (6,04 %), SO₃ (4,97 %), K₂O (3,65 %) hamda ekologik jihatdan xavfli bo'lgan PbO (1,49 %) va CdO (0,081 %) mavjudligi aniqlandi.

2. Element tarkibi (EDS): SEM-EDS tahlili asosiy metall elementlar sifatida Fe (33,82 %) va Zn (18,35 %) mavjudligini, shuningdek, muhim ikkilamchi komponentlar sifatida Ca (7,62 %), K (5,70 %), Si (5,09 %), Mn (2,51 %), S (3,14 %) va Cl (2,08 %) borligini tasdiqladi. Fe va Zn uchun moslik xatoligining 0,1% dan pastligi tahlilning yuqori darajada ishonchli ekanini ko'rsatadi.

3. Zarrachalar o'lchami: Lazer difraksiyasi tahlili D50 - 11,455 μm , D90 - 34,573 μm va hajm bo'yicha o'rtacha diametr - 15,428 μm ekanini aniqladi. Bu natijalar ushbu changni termik ishlov berishdan oldin pelletlashni talab qiladigan o'ta mayda dispersli sanoat qo'shimcha mahsuloti sifatida tasniflash imkonini beradi.

4. Qayta ishlash salohiyati: Rux miqdorining yuqoriligi (>15 % ZnO) bu changni Vels usulida pirometallurgik qayta ishlash uchun iqtisodiy jihatdan maqbul xomashyo qatoriga qo'yadi. Tarkibidagi ishqoriy xloridlarning ko'pligi pechning o'tga chidamli qoplamasini va mahsulot sifatini himoya qilish uchun uni dastlab suv bilan yuvish bosqichini o'tkazishni taqozo etadi. Texnik jihatdan maqbul muqobil usul gidrometallurgik ishqorlash bo'lib, optimallashtirilgan kislotali sharoitlarda ruxni 85-97% gacha ajratib olishga erishish mumkin [10].

5. Ekologik holati: Ushbu YPEP (yoyli po'lat eritish pechi) changi tarkibidagi tanlab eritiluvchan Pb, Cd va Zn miqdori me'yoriy chegaralardan oshib ketganligi sababli xavfli chiqindilar tasnifiga kiradi. Metallarni ajratib olish uchun nazorat ostida qayta ishlash aylanma iqtisodiyot doirasida ham ekologik zarurat, ham iqtisodiy imkoniyat hisoblanadi [7].

Keyingi tadqiqotlarda pirometallurgik va gidrometallurgik jarayon sharoitlarini optimallashtirish uchun muhim parametr bo'lgan ZnFe₂O₄:ZnO nisbatini miqdoriy baholash maqsadida rentgen-difraksion tahlil (XRD) yordamida mineralogik faza aniqlanishi, shuningdek, amaldagi

milliy me'yoriy hujjatlarga muvofiq xavflilik | sinovlari o'tkazilishi lozim.
darajasini rasman belgilash uchun TCLP
(toksiklikni aniqlashning yuvib chiqarish usuli)

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Колисниченко, В. (2025, June 12). Доля ЭДП в мировом производстве стали за 2024 год выросла до 29,1%. GMK Center. <https://gmk.center/news/dolya-edp-v-mirovom-proizvodstve-stali-za-2024-god-vyros-la-do-29-1/>
- [2] Rizescu, C.-Z., Bacinschi, Z., Stoian, E.-V., & Poinescu, A.-A. (2010). Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. *Advances in Waste Management: Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Waste Management, Water Pollution, Air Pollution, Indoor Climate (WWAI'10)*, 139–143.
- [3] Hamann, C., Piehl, P., Weingart, E., Stolle, D., Al-Sabbagh, D., Ostermann, M., Auer, G., & Adam, C. (2024). Selective removal of zinc and lead from electric arc furnace dust by chlorination–evaporation reactions. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133421. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133421>
- [4] Hernández Buitrago, L. J., Daza Prada, I., Amaral-Labat, G., Beneduce Neto, F., & Lenz e Silva, G. F. B. (2018). Microstructural, thermochemistry and mechanical evaluation of self-reducing pellets using electric arc furnace (EAF) dust containing zinc for Waelz process. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(2), e-12006. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180002.0343>
- [5] Nair, A. T., Mathew, A., Archana, A. R., & Abdul Akbar, M. (2022). Use of hazardous electric arc furnace dust in the construction industry: A cleaner production approach. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134282>
- [6] Самадов, А. У., Тошкодирова, Р. Э., & Жалолов, Б. А. (2024). Анализ цинксодержащей пыли, образующейся при производстве стали. *Universum: технические науки*, (3), 20–23. <https://doi.org/10.32743/UniTech.2024.129.12.18967>
- [7] Machado, J. G., Brehm, F. A., Moraes, C. A., Santos, C. A., Vilela, A. C., & Cunha, J. B. (2006). Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 953–960. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.01.044>
- [8] Samadov, A. U., Jalolov, B. A., & Kamalova, I. M. (2025). Po'lat eritish texnogen changlarining mikrostrukturaviy va elementar tarkibini TEM–EDS usullarida o'rganish. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*, 6(2), 53–61.
- [9] Al Jabri, M. J., Sangeetha, B. M., & Dwivedi, P. B. (2023). Optimized zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD): Hydrometallurgical process and characterization. *Green Chemistry & Technology Letters*, 9(1), 15–21. <https://doi.org/10.18510/gctl.2023.912>
- [10] Huang, J., & Yang, X. (2024). Oxygen-assisted zinc recovery from electric arc furnace dust using magnesium chloride. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 31(10), 2300–2311. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-2837-4>
- [11] Chairaksa-Fujimoto, R., Inoue, Y., Umeda, N., Itoh, S., & Nagasaka, T. (2015). New pyrometallurgical process of EAF dust treatment with CaO addition. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 22(8), 788–797. <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1135-6>
- [12] Guézennec, A.-G., Huber, J.-C., Patisson, F., Sessieq, P., Birat, J.-P., & Ablitzer, D. (2005). Dust formation in electric arc furnace: Birth of the particles. *Powder Technology*, 157(1–3), 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.006>
- [13] ZNO RECYCLE. (2024, September 11). Why pelletizing EAF dust for efficient recycling in the Waelz kiln process. <https://znorecycle.com/pelletizing-eaf-dust-for-efficient-recycling-in-the-waelz-kiln-process/>

- [14] Saadati, M., Hosseinzadeh, Z., Zamani, A. A., & Ashabi, E. (2023). Evaluating the concentration and leachability of heavy metals in electric arc furnace dust: Implications for environmental management. *Journal of Engineering Management and Systems Engineering*, 2(2), 117–122. <https://doi.org/10.56578/jemse020203>
- [15] Sunnatov, J. B., & Qarshiyev, X. K. (2021). Qora metallurgiyada hosil bo‘lgan changlardan rangli metallarni ajratib olish texnologiyalarini o‘rganish va tahlil qilish. *Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences*, 1(4), 1414–1427.
- [16] Morcali, M. H., Yucel, O., Aydin, A., & Derin, B. (2012). Carbothermic reduction of electric arc furnace dust and calcination of Waelz oxide by semi-pilot scale rotary furnace. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 48(2), 173–184. <https://doi.org/10.2298/JMMB111219031M>
- [17] Özcan, D., Karaoğlu, K. M., & Çelik, M. (2024). Classification of zinc recovery quality from EAF dust using machine learning: A Waelz process study. *Engineering Perspective*, 4(4), 171–177. <https://doi.org/10.29228/eng.pers.79502>
- [18] Havlik, T., Turzakova, M., Stopić, S., & Friedrich, B. (2005). Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid. *Hydrometallurgy*, 77(1–2), 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.10.008>
- [19] Havlík, T., Souza, B. V., Bernardes, A. M., Schneider, I. A. H., & Miškuřová, A. (2006). Hydrometallurgical processing of carbon steel EAF dust. *Journal of Hazardous Materials*, 135, 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.067>
- [20] Duan, W., Dong, X., Gao, L., Wang, Z., Wang, J., et al. (2025). Zn recovery strategies from steelmaking dust: A comprehensive review. *Separation and Purification Technology*, 378, 134694. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134694>
- [21] Trifunović, V., Avramović, Lj., Jonović, R., Milić, S., Đorđević, S., & Jonović, M. (2021). Hydrometallurgical treatment of electric arc furnace dust in aim of zinc separation. In *Proceedings of the 52nd International October Conference on Mining and Metallurgy (IOC 2021)*.
- [22] Bayraktar, A. C., Avşar, E., Toröz, I., Alp, K., & Hanedar, A. (2015). Stabilization and solidification of electric arc furnace dust originating from steel industry by using low grade MgO. *Archives of Environmental Protection*, 41(4), 62–66. <https://doi.org/10.1515/aep-2015-0040>
- [23] Xoliqulov, D. B., Xaydaraliev, X. R., & Qarshiyev, H. K. (2020). Olmaliq KMK AJ rux ishlab chiqarish zavodi sharoitida rux keklarini gidrometallurgik qayta ishlash imkoniyatlarini tahlil qilish. *Journal of Advances in Engineering Technology*, (2), 54–58. <https://doi.org/10.24412/2181-1431-2020-2-54-58>
- [24] Chen, L., Liu, W., Jiao, F., Yang, C., Li, G., Liu, S., & Qin, W. (2023). Separation and recovery of zinc, lead and iron from electric arc furnace dust by low temperature smelting. *Separation and Purification Technology*, 312, 123355. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123355>
- [25] Hoffelner, F. (2022). Kinetic aspects of the selective reduction of zinc ferrite with H₂ in the processing of electric arc furnace dust (Master's thesis). *Montanuniversität Leoben*.
- [26] Koishina, G., Dosmukhamedov, N., Kaplan, V., Nursainov, I., & Zholdasbay, Y. (2025). Technology for producing pure lead-free zinc oxide from electric arc furnace (EAF) dust. *Engineering Journal of Satbayev University*, 147(2), 17–23. <https://doi.org/10.51301/ejsu.2025.i2.03>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Jalolov, B. A., Mirzavaliyev, D. B., Qarshiyev, H. K., & Kamalova, I. M. (2026). Rux saqlovchi yoyli po‘lat eritish pechi changining tavsifi va qayta ishlash imkoniyatlari tahlili. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.1>

UO‘K: 542.92:622.7:622.7-17

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.4

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

YANGI ANGREN VA ANGREN ISSIQLIK ELEKTR STANSIYALARINING KUL-SHLAK AG‘DARMALARI HAJMI VA ULARDAN FOYDALANISH ISTIQBOLLARINI O‘RGANISH



**Almatov Ilxomjon
Mirzabek o'g'li**

Texnika fanlari doktori, katta ilmiy
xodim, "Mineral resurslar instituti"
DM markaz mudiri, Toshkent,
O'zbekiston
E-mail: ilkhom90@list.ru
ORCID ID: 0000-0002-6614-9487
Science ID: DTV-0925-0009



**Xatamov G'ayrat
Alimansurovich**

"Mineral resurslar instituti" DM,
stajyor tadqiqotchi, Toshkent,
O'zbekiston
E-mail:
gayartxatomov06@gmail.com
Science ID: MTV 1225-0051



**Jabborov Ergash
Yusuf o'g'li**

"Mineral resurslar instituti" DM,
kichik ilmiy xodimi, Toshkent,
O'zbekiston
E-mail:
ergashjabborov92@gmail.ru
ORCID ID: 0009-0008-0299-1529
Science ID: MSN 0525-0169



**Sodiqov Farrux Sobirjon
o'g'li**

"Mineral resurslar instituti" DM,
kichik ilmiy xodim, Toshkent,
O'zbekiston
E-mail: sobirovich.fs@mail.ru
ORCID ID: 0009-0002-7637-954X
Science ID: MFR 0525-0078

Annotatsiya. Ushbu maqolada Yangi Angren va Angren issiqlik elektr stansiyalarida hosil bo'ladigan kul-shlak ag'darmalarining hajmi, tarkibi va ulardan kompleks foydalanish istiqbollari o'rganilgan. Respublikadagi kul-shlak chiqindilarining to'planish dinamikasi, ularning ekologik ta'siri hamda sanoat uchun qimmatli komponentlar manbai sifatidagi ahamiyati tahlil qilingan. Shuningdek, kul-shlak chiqindilarini gravitatsion, magnit va gidrometallurgik usullar yordamida qayta ishlash imkoniyatlari, jahon tajribasi hamda O'zbekistonda ularni iqtisodiy jihatdan samarali utilizatsiya qilish yo'nalishlari ko'rib chiqilgan. Tadqiqot natijalari kul-shlak ag'darmalarini ikkilamchi mineral xomashyo sifatida kompleks qayta ishlash ekologik xavfsizlikni oshirish, resurslardan oqilona foydalanish va qimmatli metallarni ajratib olish samaradorligini ta'minlashini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: kul-shlak ag'darmalari, issiqlik elektr stansiyasi, Yangi Angren IES, Angren IES, texnogen chiqindilar, kompleks qayta ishlash, gidrometallurgiya, magnit separatsiya, qimmatli metallar, ekologiya.

Received: 02.07.2026

Accepted: 29.07.2026

Issue publication: 28.09.2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМОВ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТВАЛОВ НОВО- АНГРЕНСКОЙ И АНГРЕНСКОЙ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПЕРСПЕКТИВ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

**Алматов Илхомжон
Мирзабек угли**

Доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
руководитель центра
Государственного учреждения
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан

**Хатамов Гайрат
Алимансурович**

Стажёр-исследователь
Государственного учреждения
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан

**Жабборов Эргаш Юсуф
угли**

Младший научный сотрудник
Государственного учреждения
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан

**Садыков Фаррух
Собиржон угли**

Младший научный сотрудник
Государственного учреждения
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В статье исследованы объёмы золошлаковых отвалов Ново-Ангренской и Ангренской тепловых электростанций, их вещественный состав и перспективы комплексной переработки. Проведён анализ накопления золошлаковых отходов, их экологического воздействия и потенциала использования в качестве вторичного минерального сырья. Рассмотрены возможности применения гравитационных, магнитных и гидрометаллургических методов переработки, а также мировой опыт рационального использования золошлаковых отходов. Показано, что комплексная переработка золошлаковых материалов способствует снижению экологической нагрузки, повышению эффективности использования минеральных ресурсов и извлечению ценных компонентов.

Ключевые слова: золошлаковые отвалы, тепловая электростанция, Ново-Ангренская ТЭС, Ангренская ТЭС, техногенные отходы, комплексная переработка, гидрометаллургия, магнитная сепарация, ценные металлы, экология.

STUDY OF THE VOLUME OF ASH AND SLAG DUMPS AT THE NEW ANGREN AND ANGREN THERMAL POWER PLANTS AND PROSPECTS FOR THEIR UTILIZATION

**Almatov Ilkhomjon
Mirzabek ugli**

Doctor of Technical Sciences,
Senior Researcher, Head of the
Center, Institute of Mineral
Resources, State Institution,
Tashkent, Uzbekistan

**Khatamov Gayrat
Alimansurovich**

Trainee Researcher, Institute of
Mineral Resources, State
Institution, Tashkent, Uzbekistan

**Jabborov Ergash
Yusuf ugli**

Junior Researcher, Institute of
Mineral Resources, State
Institution, Tashkent, Uzbekistan

**Sodiqov Farrukh
Sobirjon ugli**

Junior Researcher, Institute of
Mineral Resources, State
Institution, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. This paper investigates the volume, composition, and utilization potential of ash and slag disposal sites at the New Angren and Angren Thermal Power Plants. The accumulation of ash and slag waste, its environmental impact, and its potential as a secondary mineral resource are analyzed. The study evaluates the applicability of gravity, magnetic, and hydrometallurgical processing methods and reviews international experience in the efficient utilization of ash and slag waste. The results demonstrate that the integrated processing of ash and slag materials can reduce environmental impacts, improve resource efficiency, and enable the recovery of valuable metals and other useful components from technogenic waste.

Keywords: ash and slag dumps, thermal power plant, New Angren TPP, Angren TPP, technogenic waste, integrated processing, hydrometallurgy, magnetic separation, valuable metals, environmental protection.

Kirish. Hozirgi kunda O'zbekistonda issiqlik elektr stansiyalarida hosil bo'ladigan kul-shlak chiqindilarini kompleks qayta ishlash bo'yicha samarali sanoat texnologiyalari yetarli darajada joriy etilmagan. Mazkur chiqindilarning faqat cheklangan qismi qurilish materiallari va sement ishlab chiqarishda qo'llanilmoqda. Aslida esa kul-shlak chiqindilari tarkibida temir, alyuminiy oksidi (gliноzyom), qimmatbaho, kamyob hamda nodir yer elementlari mavjud bo'lib, ular metallurgiya, qurilish materiallari, issiqlik izolyatsiyalovchi mahsulotlar va agressiv muhitlarga chidamli betonlar ishlab chiqarish uchun muhim ikkilamchi

xomashyo manbai hisoblanadi.

Kul-shlak chiqindilari qimmatli metallarning noan'anaviy manbasi sifatida alohida ilmiy va amaliy ahamiyatga ega. Ko'mir tarkibidagi mineral komponentlar va sorbsion xususiyatlar tufayli unda turli qimmatbaho hamda kamyob elementlar to'planadi. Ko'mirning yonish jarayonida organik moddalarning yo'qolishi natijasida ushbu elementlarning kul tarkibidagi konsentratsiyasi bir necha barobar ortadi va ularni sanoat miqyosida ajratib olish imkoniyati yuzaga keladi. Ayniqsa, Angren qo'ng'ir ko'miridan hosil bo'ladigan kul-shlak chiqindilari tarkibida qimmatli

komponentlarning nisbatan yuqori miqdorda uchrashi ularni qayta ishlashni iqtisodiy jihatdan istiqbolli yo'nalishga aylantiradi. Shu sababli kul-shlak chiqindilarini boyitish, ulardan qimmatbaho, kamyob va nodir metallarni kompleks ajratib olishning samarali texnologiyalarini ishlab chiqish zamonaviy kon-metallurgiya sanoatining dolzarb ilmiy-texnik vazifalaridan biri hisoblanadi [1].

Issiqlik elektr stansiyalarida hosil bo'ladigan kul-shlak chiqindilarini kompleks qayta ishlash nafaqat ekologik muammolarni kamaytirish, balki texnogen chiqindilarni samarali utilizatsiya qilish, tabiiy mineral resurslardan foydalanish darajasini oshirish hamda sanoat uchun zarur bo'lgan qimmatli metallarni nisbatan past tannarxda olish imkonini beradi. Hozirgi vaqtda elektr stansiyalari chiqindilarining atigi 10–15% qismi turli ishlab chiqarish tarmoqlarida foydalanilayotgan bo'lsa-da, ularning resurs salohiyati bundan ancha yuqori bo'lib, mazkur yo'nalishda kompleks ilmiy tadqiqotlar olib borishni talab etadi [2].

Yangi Angren issiqlik elektr stansiyasi kul-shlak chiqindilarining moddiy tarkibini o'rganish natijasida ularning asosiy qimmatli komponentlari temir va alyuminiy oksidlari ekanligi aniqlandi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, namuna tarkibidagi umumiy temir miqdori 22,61%, glinozyom (Al_2O_3) miqdori esa 13,5% ni tashkil etdi. Bundan tashqari, kul-shlak chiqindilarida qimmatbaho metallar hamda nodir yer elementlarining mavjudligi aniqlandi. Moddiy tarkib tahlili asosida mazkur chiqindilarni qayta ishlashda gravitatsion boyitish va gidrometallurgik texnologiyalarni qo'llash maqsadga muvofiq deb baholandi [3].

Mazkur natijalardan kelib chiqib, kul-shlak chiqindilaridan oltin va kumushni ajratib olish imkoniyatlarini aniqlash bo'yicha texnologik tadqiqotlar olib borildi. Tadqiqot obyekti sifatida Yangi Angren va Angren issiqlik elektr stansiyalarining kul-shlak chiqindilari tanlandi. Tadqiqot namunalari asosan qora va kulrang, ayrim hollarda oqish-kulrang tusdagi, g'ovakli hamda pemzasimon tuzilishga ega shlaklardan iborat bo'lib, zarracha o'lchamlari 0,01 mm dan 3,00 mm gacha ekanligi aniqlandi.

Eksperimental tadqiqotlar FM-1M va FM-2M flotatsiya mashinalari, SKO-05 konsentratsiya stoli, Knelson-3.5 markazdan qochma konsentratori hamda EBM 32/20 rusumli ho'l magnit

separatoridan foydalangan holda amalga oshirildi. Tahlillar kul tarkibida qimmatbaho metallarning taqsimlanishi notekis ekanligini ko'rsatdi. Boshlang'ich namunalarda oltin miqdori 0,015–1,76 g/t oralig'ida bo'lib, magnit fraksiyada uning miqdori 0,14–0,546 g/t gacha ortishi kuzatildi.

Elak tahlili natijalariga ko'ra, namunaning eng katta ulushi ($-0,2+0,071$ mm) yiriklik sinfiga to'g'ri kelib, u 41,52 % ni tashkil etdi, +2 mm sinf ulushi esa 2,1% bo'ldi. Oltinning granulometrik taqsimlanishi tahlili natijasida uning 41,99% i +2 mm fraksiyada, 40,44 % i esa $-0,071$ mm fraksiyada to'planganligi aniqlandi.

Elektron mikroskopik tadqiqotlar oltinning asosan kumush bilan tabiiy qotishma ko'rinishida hamda mis minerallari bilan assotsiatsiyalangan holda uchrashini ko'rsatdi. Oltin zarrachalari cho'ziq va notekis shaklga ega bo'lib, ularning o'rtacha o'lchami taxminan 2 mkm ni tashkil etdi.

Texnologik sinovlarda dastlabki namuna magnitli separatsiyadan o'tkazildi, magnitlanmagan fraksiya esa turli flotatsiya rejimlarida boyitildi. O'tkazilgan beshta texnologik rejimni taqqoslash natijasida ko'mir changi, neft, kerosin, $CuSO_4$, butil ksantogenati va T-66 reagentlari qo'llanilgan aglomeratsion flotatsiya usuli oltinni ajratib olish bo'yicha eng samarali rejim sifatida tavsiya etildi [4].

Texnogen kul-shlak ag'darmalarini kompleks qayta ishlash bo'yicha ishlab chiqilgan texnologik yondashuv mineral xomashyo resurslaridan samarali foydalanish, atrof-muhitga salbiy ta'sirni kamaytirish hamda yangi konlarni o'zlashtirish xarajatlarini qisqartirish imkonini beradi [5]. Taklif etilgan kompleks texnologik sxema asosida qimmatbaho metallar, nodir va kamyob yer elementlarini bosqichma-bosqich ajratib olish nazarda tutilgan bo'lib, bunda gravitatsion boyitish, magnit separatsiya va ko'p bosqichli gidrometallurgik qayta ishlash jarayonlari uyg'unlashtirilgan [6].

Shunday qilib, kompleks texnologik yondashuv kul-shlak chiqindilaridan magnetit konsentrati, qimmatbaho metallar hamda nodir yer elementlarini, ularning dastlabki miqdori juda kam bo'lgan hollarda ham, iqtisodiy jihatdan samarali ajratib olish imkonini beradi. Olingan ilmiy natijalar asosida texnologiyani sanoat sharoitida sinovdan o'tkazish, ishlab chiqarishga joriy etish va

intellektual mulk obyektlari sifatida patentlash bo'yicha tegishli ishlar olib borilishi rejalashtirilgan [7].

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Ko'mir yoqiladigan issiqlik elektr stansiyalari (IES) faoliyati natijasida katta hajmda kul-shlak chiqindilari (KShCh) hosil bo'ladi. Adabiyot manbalari tahliliga ko'ra, aksariyat IESlarda ko'mir chang holatida yoqiladi va o'choq kameralaridagi harorat 1200–1600°C oralig'ida bo'ladi. Ushbu sharoitda yonmaydigan mineral komponentlarning asosiy qismi tutun gazlari bilan birga olib chiqilib, solishtirma yuzasi 200–350 m²/kg hamda zarracha o'lchami 5–100 mkm bo'lgan uchuvchi kulni hosil qiladi. Yirikroq mineral zarrachalar esa o'choq tubiga cho'kib, qisman erishi natijasida o'lchami 0,2–30 mm bo'lgan bo'lakli yoki shishasimon shlaklar shakllanadi.

Shunday qilib, issiqlik elektr stansiyalarida hosil bo'ladigan kul-shlak chiqindilari ikki asosiy fraksiyadan iborat:

- o'choq tubida hosil bo'ladigan kul qoldig'i (shlak);
- siklonlar va chang ushlab filtrlari orqali ajratib olinadigan uchuvchi kul.

Kulning moddiy tarkibi shartli ravishda uch guruhga bo'linadi: **shishasimon**, **kristall** va **organik** qismlar.

Shishasimon qism murakkab kimyoviy tarkibga ega bo'lib, tarkibida 20 % gacha CaO mavjud bo'lgan toshko'mir va qo'ng'ir ko'mir kullarida asosan temir-alyumosilikatli shishadan tashkil topadi. Ushbu fazada Fe₂O₃, Al₂O₃ va SiO₂ asosiy shisha hosil qiluvchi komponentlar bo'lib, ularning umumiy ulushi 80–90 % ni tashkil etadi.

Kulning kristall qismi birlamchi mineral fazalar hamda yoqish jarayonida hosil bo'ladigan ikkilamchi minerallardan iborat. Asosiy minerallar qatoriga magnetit, gematit, mullit, kvarts, galenit va fayalit kiradi. Yoqish jarayonida esa kalsiy silikatlar, aluminatlar va ferritlar kabi yangi mineral birikmalar hosil bo'ladi.

Organik qism esa to'liq yonmagan yoqilg'i mahsulotlari, ya'ni koks va yarim koks zarrachalaridan tashkil topgan.

Ko'mirning mineral tarkibida galliy, germaniy, skandiy, ittriy hamda boshqa kamyob elementlar uchraydi. Ko'mir yoqilishi jarayonida galliy va germaniy yuqori harorat ta'sirida

bug'lanadi, tutun gazlari sovishi natijasida esa uchuvchi kul zarrachalari yuzasida Ga₂O₃ va GeO₂ oksidlari ko'rinishida kondensatsiyalanadi. Mazkur jarayon kul-shlak chiqindilarini nodir va kamyob metallarni ajratib olish uchun istiqbolli ikkilamchi mineral xomashyo manbai sifatida baholash imkonini beradi.

Hozirgi kunda Angren IES bo'yicha kulning yillik tushumi kul omborlariga yiliga 250 ming tonnagacha, Yangi-Angren IES bo'yicha esa 400 ming tonnagacha yetmoqda. Angren tog'-kon sanoati hududida joylashgan kul omborlarida jami 15 mln tonnadan ortiq kul-shlak chiqindilari to'plangan. Bunday chiqindilardan xo'jalik maqsadlarida foydalanish hozircha cheklangan. Ayni paytda kul-shlak chiqindilarining faqat 10% qismi qurilish sohasida ishlatilmoqda. Kul-shlak chiqindilari bo'yicha ma'lumotlar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

O'zbekiston Respublikasi hududida joylashgan kul-shlak chiqindilari omborlari to'g'risida ma'lumot

IES nomlari	Ag'darmalar	Eksplantatsiya qilishni boshlash sanasi	Hozirgi holati	Loyihalash hajmi	Maydoni, m ²	Kul-shlak hajmi, t
Yangi Angren	KSHA-1	1986 y.	2013-yil yanvar.	8 500 000 t	370 000	8 250 000
	KSHA-2	2013 y.	ishchi holatda	20 000 000 t	890 000	2 800 000
Angren	KSHA-1	1957 y.	ishchi holatda	4 904 370 m ³	180 000	1 591 586
	KSHA-2	1965 y.	ishchi holatda	3 200 000 m ³	240 000	1 872 454
	KSHA-3	1965 y.	ishchi holatda	2 600 000 m ³	400 000	1 217 035,6
Jami						15 731 075,6

Natijalar va muhokama. Hozirgi vaqtda issiqlik elektr stansiyalarida hosil bo'ladigan kul-shlak chiqindilarining (KSHCh) atigi 10–15% qismi turli sanoat tarmoqlarida qayta foydalanilmoqda, qolgan asosiy qismi esa kul-shlak ag'darmalarida to'planib, ekologik muammolarni yuzaga keltirmoqda. Shu sababli ushbu texnogen chiqindilarni kompleks qayta ishlash va ulardan samarali foydalanish dolzarb ilmiy-amaliy masalalardan biri hisoblanadi.

Jahon amaliyotida kul-shlak chiqindilaridan foydalanish bo'yicha turli texnologiyalar ishlab chiqilgan bo'lib, ular asosan qurilish materiallari ishlab chiqarish, yo'l qurilishi hamda qimmatli komponentlarni ajratib olishga yo'naltirilgan. Shunga qaramasdan, O'zbekistonda kul-shlak

chiqindilaridan foydalanish darajasi hali ham pastligicha qolmoqda.

Rivojlangan mamlakatlarda kul-shlak materiallari elektr stansiyalarining ikkilamchi mahsuloti sifatida baholanadi. Ular iste'molchiga yetkazib berilishidan oldin texnologik tayyorlanadi, fraksiyalanadi va amaldagi qurilish standartlari talablariga moslashtiriladi. MDH mamlakatlarida esa kul-shlak materiallari ko'pincha chiqindi sifatida qaraladi va qo'shimcha texnologik ishlovsiz utilizatsiya qilinadi. Holbuki, issiqlik elektr stansiyalari energiya ishlab chiqaruvchi korxona bo'lib, hosil bo'ladigan kul-shlaklarni qayta ishlash orqali yuqori qo'shimcha qiymatga ega mahsulotlar olish imkoniyati mavjud. Bunda kulning granulometrik va kimyoviy tarkibining bir xilligi asosiy texnologik talablardan biri hisoblanadi.

Hozirgi kunda kulning asosiy qismi sement, g'isht, yengil beton, shlakoblok, keramzit va boshqa qurilish materiallari ishlab chiqarishda, shuningdek, yo'l qurilishi hamda kul-shlak omborlari dambalarini barpo etishda qo'llaniladi.

Jahon tajribasida kul-shlak chiqindilarini utilizatsiya qilishning uchta asosiy yo'nalishi shakllangan:

- kul-shlak aralashmalarini yo'l qurilishi, hududlarni rejalashtirish va rekultivatsiya ishlarida to'g'ridan-to'g'ri qo'llash;
- sement, beton va boshqa qurilish materiallarini ishlab chiqarishda xomashyo sifatida foydalanish;
- qimmatbaho metallar, nodir yer elementlari hamda boshqa sanoat ahamiyatiga ega komponentlarni ajratib olish maqsadida chuqur kompleks qayta ishlash.

Kul-shlak chiqindilaridan yengil betonlar uchun to'ldiruvchi materiallar ishlab chiqarishda tabiiy qum o'rnini qisman kul bilan almashtirish iqtisodiy va texnologik jihatdan samarali hisoblanadi.

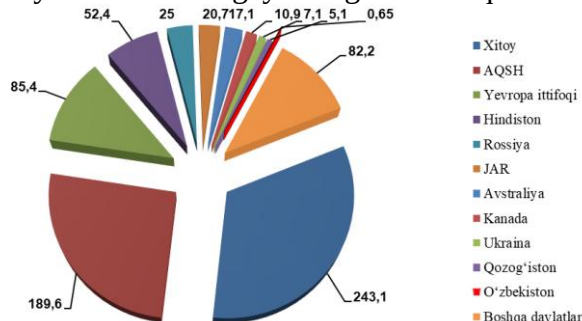
Xalqaro tajriba kul-shlak chiqindilaridan foydalanish darajasi yuqori ekanligini ko'rsatadi. Xususan, Fransiya da utilizatsiya darajasi taxminan 50 %, Germaniyada 70 %, Finlandiyada esa 90 % ga yetadi. Bunday natijalarga davlat tomonidan qo'llab-quvvatlanadigan siyosat, zamonaviy texnologiyalar va rivojlangan logistika tizimi orqali erishilgan.

Xitoyda kul-shlak chiqindilarining deyarli

barchasi qurilish materiallari ishlab chiqarishga yo'naltiriladi. Mamlakat energetika korxonalarining aksariyati ko'mir yoqilg'isidan foydalanishi sababli elektr stansiyalari yaqinida silikat g'isht ishlab chiqaruvchi korxonalar tashkil etilgan. Ishlab chiqariladigan silikat g'isht tarkibining qariyb 90 % ini kul tashkil etadi. Avtoklavlarda ishlatiladigan issiqlik energiyasi esa elektr energiyasi ishlab chiqarish jarayonida hosil bo'ladigan ikkilamchi bug' hisobiga ta'minlanadi. Natijada ishlab chiqarish tannarxi kamayadi va kul-shlak chiqindilarining deyarli to'liq utilizatsiyasiga erishiladi.

Yevropa mamlakatlari va Yaponiyada kul-shlak ag'darmalari deyarli mavjud emas. Quruq kul maxsus siloslarda saqlanadi, laboratoriya nazoratidan o'tkaziladi, granulometrik tarkibi me'yorlashtiriladi hamda iste'molchilarga standartlashtirilgan mahsulot sifatida yetkazib beriladi. Masalan, Germaniyada ko'plab issiqlik elektr stansiyalarida 40–60 ming tonna sig'imli siloslar qurilgan bo'lib, ular kulni sifat ko'rsatkichlari bo'yicha tayyorlash va saqlash imkonini beradi.

Olingan ma'lumotlar shuni ko'rsatadiki, O'zbekistonda ham kul-shlak chiqindilarini kompleks qayta ishlashning zamonaviy texnologiyalarini joriy etish, ularni ikkilamchi mineral xomashyo sifatida baholash hamda xalqaro tajribaga asoslangan utilizatsiya tizimini yaratish ekologik va iqtisodiy samaradorlikni sezilarli darajada oshirish imkonini beradi. Bu esa tabiiy mineral resurslardan oqilona foydalanish, texnogen chiqindilar hajmini kamaytirish va sanoatning xomashyo bazasini kengaytirishga xizmat qiladi.



1-rasm. 2012 Yilda dunyoda issiqlik elektr stansiyalarining (IES/TES) kul-shlak chiqindilarining o'sishi, mln. tonna.

Germaniya issiqlik elektr stansiyalarida kul-shlak chiqindilarini boshqarish tizimi yuqori darajada yo'lga qo'yilgan. Deyarli barcha elektr stansiyalarida kulni saqlash uchun yirik sig'imli siloslar mavjud bo'lib, kul-shlak omborlariga ehtiyoj deyarli qolmagan. Masalan, ayrim stansiyalarda siloslarning umumiy sig'imi 60 ming tonnagacha yetadi. Kul texnologik jihatdan qayta ishlanib, standartlashtirilgan mahsulot sifatida iste'molchilarga yetkazib beriladi.

Germaniyada uchuvchi kul sement ishlab chiqarishda keng qo'llanilib, har yili millionlab tonna tabiiy xomashyo uning hisobiga almashtiriladi. Bu nafaqat tabiiy resurslarni tejash, balki sement ishlab chiqarish jarayonida hosil bo'ladigan karbonat angidrid (CO_2) emissiyasini sezilarli darajada kamaytirishga xizmat qiladi. Natijada ekologik samaradorlik oshadi hamda xalqaro ekologik majburiyatlarni bajarishga erishiladi.

Yevropada kul-shlak chiqindilaridan samarali foydalanishni muvofiqlashtirish maqsadida 1990-yilda **Evropa Ko'mir Kuli Assotsiatsiyasi (ECOA)** tashkil etilgan. Hozirgi kunda ushbu tashkilot Yevropaning bir qator davlatlarini birlashtirib, AQSH, Kanada, Yaponiya va Isroildagi tegishli uyushmalar bilan hamkorlikda kul-shlak chiqindilarini ikkilamchi mineral xomashyo sifatida qo'llash bo'yicha ilmiy va amaliy faoliyat olib bormoqda. Assotsiatsiya a'zolari kulning ekologik xavfsiz qurilish materiali sifatidagi ahamiyatini keng targ'ib etadi.

Yevropa mamlakatlarida hosil bo'ladigan kulning asosiy qismi qurilish sanoatida, jumladan sement, beton va boshqa qurilish materiallari ishlab chiqarishda foydalaniladi. Omborlarga joylashtiriladigan kul hajmi esa yildan-yilga qisqarib bormoqda. Bu esa chiqindilarni boshqarishning resurslarni tejovchi va ekologik jihatdan samarali modelini shakllantirganini ko'rsatadi.

Polshada kul-shlak omborlari uchun ajratiladigan yer maydonlarining iqtisodiy qiymati yuqori bo'lgani sababli elektr stansiyalari kulni qayta ishlovchi korxonalar bilan faol hamkorlik qiladi. Buyuk Britaniyada esa foydalanishdan chiqarilgan kul-shlak omborlari rekultivatsiya qilinib, sanoat hududlari, qishloq xo'jaligi yerlari hamda rekreatsion zonalarga aylantirilmoqda.

AQSHda kul-shlak chiqindilaridan foyda-

lanish bo'yicha ilmiy tadqiqotlar o'tgan asrning 30-yillaridan boshlangan. Hozirgi kunda har yili hosil bo'ladigan o'nlab million tonna uchuvchi kul asfalt-beton aralashmalari, silikat g'isht, beton buyumlar, gidrotexnika inshootlari va boshqa qurilish materiallari ishlab chiqarishda keng qo'llaniladi. Atrof-muhitni muhofaza qilish agentligi tomonidan uchuvchi kulning qurilish materiallari tarkibida qo'llanishi ekologik jihatdan xavfsiz deb e'tirof etilgan.

Qozog'iston va Rossiyada ham kul-shlak chiqindilarining yillik hajmi millionlab tonnani tashkil etadi. Shunga qaramay, ularning asosiy qismi hanuz kul-shlak omborlarida saqlanmoqda. Bu esa katta yer maydonlarining band bo'lishiga, ekologik yuklamaning ortishiga hamda elektr energiyasi ishlab chiqarish xarajatlarining oshishiga sabab bo'lmoqda.

Jahon tajribasi shuni ko'rsatadiki, kul-shlak chiqindilarini qayta ishlashning eng samarali modeli kompleks texnologik yondashuvga asoslanadi. Bunday texnologiya odatda uch asosiy bosqichni o'z ichiga oladi: dastlab kul-shlak materiallarini fraksiyalarga ajratish va tayyorlash, keyinchalik magnit hamda gravitatsion boyitish usullari orqali qimmatli metall komponentlarini ajratib olish, so'ngra qolgan mineral mahsulotlardan sement, beton va boshqa qurilish materiallarini ishlab chiqarish.

Shunday qilib, xalqaro tajriba kul-shlak chiqindilarini kompleks qayta ishlash texnologiyalarini joriy etish ekologik xavfsizlikni ta'minlash, tabiiy resurslardan oqilona foydalanish, energiya sarfini kamaytirish hamda yuqori qo'shimcha qiymatga ega mahsulotlar ishlab chiqarishni yo'lga qo'yishda muhim omil ekanligini tasdiqlaydi. Mazkur tajribalarni O'zbekiston sharoitiga moslashtirish kul-shlak chiqindilaridan foydalanish samaradorligini sezilarli darajada oshirish imkonini beradi.

Xulosa. O'zbekistonda, jahon tajribasi va Angren hamda Yangi-Angren IESlarining KSHA (kul-shlak ag'darmalari) xususiyatlarini hisobga olgan holda, texnogen chiqindilarni sanoatda katta ahamiyatga ega bo'lgan turli mahsulotlarni olish uchun foydalanish mumkin. Jumladan: temir, noyob va kamyob yer metallari, kremniy va alyuminiy birikmalari, magnit mikrosferalar.

KSHA dan noyob metallarni olish sanoat

rudalaridan olishga nisbatan arzonroq bo'lishi mumkin, chunki xomashyo qazib olish xarajatlarini tejash imkoniyati mavjud.

KSHA turli sohalaridagi ishlab chiqarishda samarali ravishda qayta tiklanuvchi xomashyo sifatida ishlatilishi mumkin. Biroq, iqtisodiy rentabellik katta darajada kulning sifatiga va olingan mahsulotni realizatsiya qilish shartlariga bog'liq. Energetika chiqindilarining xossalari turlicha bo'lgani uchun, har bir KSHA guruhi o'ziga xos utilizatsiya sxemasini talab qiladi, bunda turli xarajatlar, konfiguratsiya, ishlab chiqarish quvvati va mahsulot assortimenti zarur bo'ladi.

Qazib olish chiqindilari (balansdan tashqari

rudalar), boyitish fabrikalarining xaltalari va deyarli barcha metallurgiya hamda yoqilg'i-energetika ishlab chiqarish chiqindilari, ulardan foydali komponentlarni qo'shimcha olishdan so'ng, qurilish sanoatida ishlatilishi mumkin. Qurilish materiallari ishlab chiqarish uchun kamida 30% ochiq qatlam va boyitish chiqindilari, shuningdek, foydali qazilmalarni chuqur qayta ishlash chiqindilarining katta qismi mos keladi. Turli shlaklar, kul va boshqa chiqindilar amalda barcha mavjud qurilish xomashyolarini almashtirishi va yuqori ishlash, iqtisodiy va estetik xususiyatlarga ega yangi materiallar yaratishda ishlatilishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Леонов, С. Б., Федотов, К. Ф., & Сенченко, А. Е. (1998). Промышленная добыча золота из золошлаковых отвалов тепловых электростанций. Горный журнал, (5), 67–68.
- [2] Хурсанов, А. Х., Хасанов, А. С., & Вохидов, Б. Р. (2019). Разработка технологии получения аффинированного палладиевого порошка из отработанных электролитов. Горный вестник Узбекистана, (1), 58–61.
- [3] Хасанов, А. С., Вохидов, Б. Р., & Мамараимов, Г. Ф. (2020). Изучение возможности извлечения ванадия из техногенных отходов. Илмий техника журнали Ферганского политехнического института, 24(3), 97–102.
- [4] Хасанов, А. С., Вохидов, Б. Р., Хамидов, Р. А., Сирожов, Т. Т., Мамараимов, Г. Ф., & Хужамов, У. У. (2019). Исследование повышения степени извлечения и чистоты аффинированного палладиевого порошка из сбросных растворов. Universum: технические науки, (9), 20–30.
- [5] Хасанов, А. С., & Вохидов, Б. Р. (2019). Research of technological processes of vanadium distribution in Uzbekistan. Proceedings of the XI International Correspondence Scientific Specialized Conference «International Scientific Review of the Technical Sciences, Mathematics and Computer Science». Boston, USA.
- [6] Хасанов, А. С., Вохидов, Б. Р., & Мамараимов, Г. Ф. (2020). Разработка технологии получения пятиоксида ванадия из минерального и техногенного сырья. Universum: технические науки, (1), 78–86.
- [7] Хасанов, А. С., Вохидов, Б. Р., Арипов, А. Р., Асроров, А. А., Пирназаров, Ф. Г., Шарипов, С. Ш., & Немененко, Б. М. (2020). Исследование повышения степени извлечения аффинированного палладиевого порошка из сбросных растворов. Литье и металлургия, (1), 78–86.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Almatov, I. M., Xatamov, G. A., Jabborov, E. Y., & Sodiqov, F. S. (2026). Yangi Angren va Angren issiqlik elektr stansiyalarining kul-shlak ag'darmalari hajmi va ulardan foydalanish istiqbollari o'rganish. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.4>

UO‘K: 542.92:622.7:622.7-17

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.6

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ANGREN VA YANGI ANGREN ISSIQLIK ELEKTR STANSIYALARI KUL-SHLAK CHIQINDILARIDAN OLINGAN TEXNOLOGIK NAMUNALARNING MODDIY TARKIBINI TADQIQ ETISH



**Almatov Ilxomjon
Mirzabek o'g'li**

Texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim, "Mineral resurslar instituti" DM markaz mudiri, Toshkent, O'zbekiston
E-mail: ilkhom90@list.ru
ORCID ID: 0000-0002-6614-9487
Science ID: DTV-0925-0009



**Xatamov G'ayrat
Alimansurovich**

"Mineral resurslar instituti" DM, stajyor tadqiqotchi, Toshkent, O'zbekiston
E-mail: gayartxatomov06@gmail.com
Science ID: MTV 1225-0051



**Botirov Mirmuxsin
Sherali o'g'li**

"Mineral resurslar instituti" DM, kichik ilmiy xodim, Toshkent, O'zbekiston,
E-mail: mirmuxsin1994@mail.ru
ORCID ID: 0009-0007-0280-8563
Science ID: MSN 0525-0168



**G'ulomov Ibroxim
Inomjonovich**

"Mineral resurslar instituti" DM, kichik ilmiy xodim, Toshkent, O'zbekiston,
E-mail: ibrohimtdtu97@gmail.com
Science ID: MTV-0525-0084

Annotatsiya. Mazkur maqolada Angren va Yangi Angren issiqlik elektr stansiyalarining kul-shlak chiqindilaridan olingan texnologik namunalarning moddiy tarkibi kompleks ravishda tadqiq etilgan. Tadqiqotlar davomida namunalarning kimyoviy, mineralogik, granulometrik hamda massaspektrometrik (ICP-MS) tahlillari amalga oshirildi. Natijalar asosida asosiy jins hosil qiluvchi komponentlar, jumladan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 va boshqa oksidlarning miqdoriy tarkibi, shuningdek molibden, vismut, tellur, selen, palladiy, oltin va kumush kabi qimmatbaho hamda kamyob elementlarning mavjudligi baholandi. Kul-shlak chiqindilarining texnologik xususiyatlari ularni gravitatsion, magnit va flotatsion boyitish usullari orqali kompleks qayta ishlash imkoniyatini tasdiqlashi ko'rsatildi. Olingan natijalar issiqlik elektr stansiyalari texnogen chiqindilaridan ikkilamchi mineral xomashyo sifatida samarali foydalanish hamda qimmatli komponentlarni sanoat miqyosida ajratib olish texnologiyalarini ishlab chiqishda ilmiy-amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: issiqlik elektr stansiyasi, kul-shlak chiqindilari, texnologik namuna, moddiy tarkib, kimyoviy tahlil, ICP-MS, granulometrik tarkib, qimmatbaho metallar, nodir elementlar, boyitish, texnogen xomashyo.

Received: 02.07.2026

Accepted: 01.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ АНГРЕНСКОЙ И НОВО-АНГРЕНСКОЙ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Алматов Илхомжон
Мирзабек угли

Доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
руководитель центра
Государственного учреждения
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан

Хатамов Гайрат
Алимансурович

Стажёр-исследователь
Государственного учреждения
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан

Ботиров Мирмухсин
Шерали угли

Младший научный сотрудник ГУ
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан

Гуломов Иброхим
Иномжонович

Младший научный сотрудник ГУ
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования вещественного состава технологических проб, полученных из золошлаковых отходов Ангренской и Ново-Ангренской тепловых электростанций. Выполнены химический, минералогический, гранулометрический и масс-спектрометрический (ICP-MS) анализы исследуемых образцов. Определено содержание основных породообразующих компонентов (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 и др.), а также проведена оценка содержания молибдена, висмута, теллура, селена, палладия, золота, серебра и других ценных элементов. Установлено, что исследуемые золошлаковые отходы обладают технологическими свойствами, позволяющими применять гравитационные, магнитные и флотационные методы обогащения при их комплексной переработке. Полученные результаты могут служить научной основой для разработки технологий извлечения ценных компонентов и эффективного использования золошлаковых отходов в качестве вторичного минерального сырья.

Ключевые слова: тепловая электростанция, золошлаковые отходы, технологическая проба, вещественный состав, химический анализ, ICP-MS, гранулометрический состав, драгоценные металлы, редкие элементы, обогащение, техногенное сырьё.

STUDY OF THE MATERIAL COMPOSITION OF TECHNOLOGICAL SAMPLES OBTAINED FROM ASH AND SLAG WASTES OF THE ANGREN AND NOVO-ANGREN THERMAL POWER PLANTS

Almatov Ilkhomjon

Doctor of Technical Sciences,
Senior Researcher, Head of the
Center, Institute of Mineral
Resources, State Institution,
Tashkent, Uzbekistan

Khatamov Gayrat

Trainee Researcher, Institute of
Mineral Resources, State
Institution, Tashkent, Uzbekistan

Botirov Mirmukhsin

Junior Researcher, State Institution
“Institute of Mineral Resources”,
Tashkent, Uzbekistan

Jabbarov Ergash

Junior Researcher, State Institution
“Institute of Mineral Resources”,
Tashkent, Uzbekistan

Abstract. This paper presents the results of a comprehensive investigation into the material composition of technological samples obtained from ash and slag wastes of the Angren and Novo-Angren Thermal Power Plants. Chemical, mineralogical, granulometric, and ICP-MS analyses were carried out to determine the composition and technological characteristics of the samples. The contents of the major rock-forming oxides, including SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 , as well as valuable and rare elements such as molybdenum, bismuth, tellurium, selenium, palladium, gold, and silver, were evaluated. The obtained results demonstrate that the investigated ash and slag wastes possess favorable technological properties for integrated processing using gravity, magnetic separation, and flotation methods. The findings provide a scientific basis for the development of technologies aimed at recovering valuable components and utilizing thermal power plant wastes as secondary mineral resources.

Keywords: thermal power plant, ash and slag waste, technological sample, material composition, chemical analysis, ICP-MS, granulometric composition, precious metals, rare elements, mineral processing,

Kirish. Hozirgi kunda ilmiy-texnik taraqqiyot sur'atlarining jadallashuvi tabiiy resurslarga bo'lgan talabning ortishi bilan bir qatorda sanoat

chiqindilari hajmining keskin ko'payishiga ham sabab bo'lmoqda. Shu bois ishlab chiqarish chiqindilaridan oqilona foydalanish, ularni qayta

ishlashning samarali texnologiyalarini joriy etish hamda atrof-muhitni muhofaza qilish masalalari zamonaviy ilmiy tadqiqotlarning ustuvor yo'nalishlaridan biriga aylangan [1].

Global ekologik va iqtisodiy muammolardan biri konchilik sanoati chiqindilari hamda qattiq yoqilg'ilarni yoqish natijasida hosil bo'ladigan kul-shlak chiqindilarini kompleks qayta ishlash hisoblanadi. Bir tomondan, bunday texnogen xomashyo tarkibida qimmatbaho, rangli va kamyob metallarning mavjudligi ularni qazib olish, tashish hamda maydalash xarajatlarini talab qilmasligi sababli qayta ishlashning iqtisodiy samaradorligini oshiradi. Ikkinchi tomondan esa, yillar davomida to'planib borayotgan sanoat chiqindilari katta maydonlarni egallab, ekologik muvozanatning buzilishiga, tuproq va yer osti suvlarining ifloslanishiga hamda atrof-muhit holatining yomonlashishiga olib kelmoqda [2–3].

Sanoat chiqindilari bilan atrof-muhitning ifloslanishi bugungi kunning eng dolzarb ekologik muammolaridan biri bo'lib, uning asosiy ulushi tog'-kon sanoati hissasiga to'g'ri keladi. Respublikamizda har yili 60 mln tonnadan ortiq foydali qazilmalar qazib olinadi. Biroq qazib olingan mineral xomashyoning atigi 1–2 foizigina tayyor mahsulot sifatida foydalaniladi, qolgan qismi esa boyitish va qayta ishlash jarayonlaridan so'ng chiqindi omborlariga joylashtiriladi [4–5].

Texnogen chiqindilar asosan foydali qazilmalarni qazib olish va ularni qayta ishlash jarayonlarida hosil bo'ladi. Ular balansdagi va balansdan tashqari zaxiralar, chiqindi omborlari hamda toshqol ag'darmalarida to'planib, ikkilamchi mineral xomashyo manbai sifatida qaraladi. Shu sababli bunday obyektlar ilmiy adabiyotlarda «texnogen konlar» deb yuritilib, mineral resurslarning istiqbolli qo'shimcha manbalaridan biri sifatida e'tirof etiladi [6–7].

Mamlakatimizda amalga oshirilayotgan iqtisodiy islohotlar sharoitida mineral resurslardan kompleks va samarali foydalanish, shuningdek texnogen chiqindilarni qayta ishlash texnologiyalarini takomillashtirish muhim ilmiy-amaliy vazifalardan biri hisoblanadi. Foydali qazilmalarni qazib olishning ekstensiv usullaridan foydalanish yangi konlarni o'zlashtirish zaruratini yuzaga keltirib, yuqori sifatli rudalar zaxirasining kamayishiga sabab bo'lmoqda. Natijada qazib olish

sharoiti murakkab, foydali komponentlar miqdori past bo'lgan konlarni o'zlashtirishga to'g'ri kelmoqda. Bu esa ko'proq tog' massasini qazib olish va qayta ishlashni, energiya hamda moddiy resurslar sarfining ortishini, ishlab chiqarish tannarxining oshishini va texnogen chiqindilar hajmining yanada ko'payishini keltirib chiqaradi [8].

Shu nuqtai nazardan, texnogen chiqindilarni moddiy tarkibi bo'yicha baholash, ulardagi foydali komponentlar miqdorini aniqlash hamda ularning sanoat ahamiyatini asoslash alohida ilmiy ahamiyat kasb etadi. Bunday baholashda alohida elementlarning geokimyoviy tarqalish darajasini tavsiflovchi A.P. Vinogradov tomonidan taklif etilgan klark qiymatlaridan keng foydalaniladi. Ushbu ko'rsatkichlar texnogen xomashyodagi qimmatli elementlarning istiqbolliligini baholash va ularni qayta ishlashning iqtisodiy samaradorligini aniqlashda muhim mezon hisoblanadi [9].

Tadqiqot materiallari va metodlari.

Tadqiqot obyekti sifatida Angren va Yangi Angren issiqlik elektr stansiyalarining kul-shlak chiqindilaridan olingan texnologik namunalar tanlandi. Namunalarni laboratoriya tadqiqotlariga tayyorlash ishlari RETSCH kompaniyasining RM 200 markali laboratoriya mexanik stupkasida amalga oshirildi. Namunalar aralashtirish, qisqartirish va o'rtachalash usullari orqali tayyorlanib, mineralogik, kimyoviy hamda spektral tahlillar uchun alohida o'rtacha namunalar ajratildi.

Namunalarning zichligi GOST 32183–2013 talablariga muvofiq aniqlandi. Eritma muhitining vodorod ko'rsatkichi (pH) pH-150MI markali pH-metr yordamida o'lchandi. Flotatsiya jarayonida muhit regulyatori sifatida soda qo'llanildi. Muhitning optimal pH qiymati foydali komponentlarning boyitmaga ajralish samaradorligini oshirish maqsadida tanlandi.

Gravitatsion boyitish sinovlari FLSmidth kompaniyasi tomonidan ishlab chiqilgan Knelson KC-MD3 markali markazdan qochma konsentratorda o'tkazildi. Tajribalar ma'dan zarra-chalarining $-0,074+0,000$ mm yiriklik sinfi, markazdan qochma kuchning 40–80 G oralig'i hamda suv sarfining 2,8–3,5 l/min qiymatlarida olib borildi. Shuningdek, texnologik namunalar va ularning qayta ishlash mahsulotlarini gravitatsion boyitish laboratoriya konsentratsion stoli (30KS)

yordamida ham amalga oshirildi.

Flotatsion tadqiqotlar 240-FML laboratoriya flotomashinasi hamda “Geopribortsvetmet” konstruksiyasidagi flotatsiya uskunasida bajarildi. Magnit ajratish ishlari 138T-SEM markali laboratoriya induksion-rolikli separator (“Geopribortsvetmet”) yordamida olib borildi. Gidrometallurgik tadqiqotlar jarayonida tanlab eritish issiqlikka chidamli 0,5 va 1,0 litr hajmdagi laboratoriya stakanlari hamda kolbalarda amalga oshirildi. Bo‘tanani aralashtirish mexanik va pnevmatik usullarda bajarildi.

Namunalarni maydalash ishlari laboratoriya maydalagichi (40ML) yordamida bajarildi. Maydalash jarayonida qattiq modda, suyuqlik va maydalovchi sharlarning og‘irlik nisbati 1:0,5:8 etib qabul qilindi.

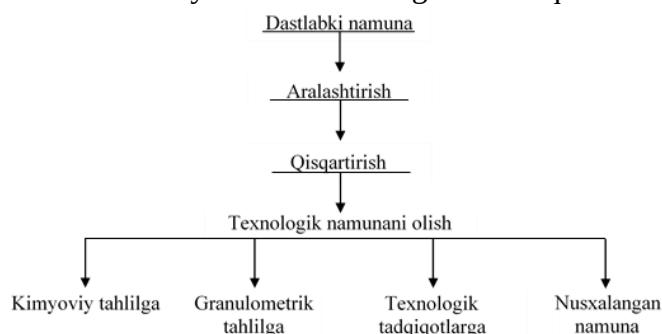
Texnologik namunalar hamda boyitish mahsulotlarining og‘irligi Ohaus Pioneer PA214 markali laboratoriya analitik tarozisida aniqlandi.

Namunalarning mineralogik tarkibi “Mineral resurslar institute” davlat muassasasining “Mineralogik tadqiqotlar” bo‘limida o‘rganildi. Mineralogik tahlillar dastlabki namuna, gravitatsion va flotatsion boyitish mahsulotlari hamda pirometallurgik qayta ishlash natijasida olingan boyitmalar asosida amalga oshirildi. Gravitatsion boyitish mahsulotlari binokulyar mikroskop ostida tadqiq qilindi. Bundan tashqari, shaffof shliflar, anshliflar va briketlar tayyorlanib, ularning mineral tarkibi NIKON Eclipse LV100NPOL rudaviy mikroskopida 40–1000 martagacha kattalashtirish rejimida o‘rganildi. Immersion suyuqliklardan foydalanilgan holda oltin zarrachalarining morfologiyasi va tarqalishi aniqlandi.

Namunalarning moddiy tarkibini aniqlash maqsadida to‘liq silikat tahlili, kimyoviy tahlil hamda ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) usullaridan foydalanildi. Spektroskopik, ICP-MS va kimyoviy tahlillar “Mineral resurslar institute” davlat muassasasi hamda “Markaziy laboratoriya” davlat korxonasi laboratoriyalarida bajarildi.

Mazkur tadqiqotlarda gravitatsion, magnit va flotatsion boyitish usullari hamda gidrometallurgik jarayonlarning kompleks qo‘llanilishi kul-shlak chiqindilarining moddiy tarkibini baholash, foydali komponentlarning taqsimlanish qonuniyatlarini aniqlash va ularni sanoat sharoitida kompleks qayta

ishlash imkoniyatlarini asoslashga xizmat qildi.



1-rasm. Tadqiqotlar uchun namunalarning tayyorlash sxemasi.

Natijalar va muhokama. Texnogen chiqindilardagi qimmatbaho elementlarning kimyoviy tarkibini o‘rganish. Dastlabki namunalar bo‘yicha spektral tahlil natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Dastlabki texnologik namunalar bo‘yicha spektral tahlil natijalari “Markaziy laboratoriya” DK ma’lumotlariga ko‘ra

Elementlar	Miqdori, g/t					
	A-1	A-2	A-3	YA-4	YA-5	YA-6
Ca	20000	20000	>30000	>30000	>30000	30000
Na	8000	6000	>10000	10000	10000	9000
K	-	-	8000	8000	8000	8000
Mg	5000	30000	>30000	>30000	>30000	>30000
Ba	6000	700	900	800	800	800
Sr	100	100	300	200	300	200
Mn	600	2000	900	800	900	800
V	30	40	60	70	70	80
Ti	1000	2000	5000	5000	5000	5000
Cr	-	100	40	90	70	30
Ag	-	-	<1	-	4	-
Cu	20	20	50	40	30	40
Pb	200	100	60	80	70	100
Zn	200	200	100	200	70	100
Ni	20	20	60	20	40	30
Co	7	3	10	7	8	9
Mo	10	2	5	2	2	1
Sn	-	-	1	2	3	3
Be	1	2	5	3	4	5
Nb	-	-	20	20	30	-
Li	-	-	40	20	40	30
Y	9	10	20	20	20	30
Yb	1	2	3	2	4	4
Zr	200	90	100	90	100	100
Sc	-	-	30	10	10	10
Ga	9	10	20	20	20	20

2-jadval

O‘rganilgan namunalarning asosiy jins hosil qiluvchi komponentlari bo‘yicha (%) kimyoviy tahlil natijalarini solishtirish, “MRI” DM va “Markaziy laboratoriya” DK tomonidan amalga oshirilgan

Namunalar nomi	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{umumiy}	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	SO ₃	K.Y.M.	CO ₂
A-1	46,59	0,31	7,29	17,79	20,43	<0,5	2,24	0,06	0,67	0,07	2,39	5,96	16,0	0,22
	44,21	0,32	7,46	18,21	21,64	0,3	2,66	0,52	1,0	0,09	2,33	5,21	12,14	0,50
A-2	50,7	0,54	15,91	4,11	0,47	<0,5	3,08	0,06	0,83	0,08	0,29	0,34	22,0	0,88
	48,74	0,51	15,08	3,91	4,11	1,51	3,36	0,77	1,16	0,10	0,40	0,73	21,51	0,60
A-3	55,83	0,88	23,2	6,43	5,99	<0,5	4,48	0,05	0,95	0,13	0,34	0,84	4,0	0,88
	54,86	0,74	21,00	6,74	8,56	1,81	5,33	1,11	1,55	0,12	0,47	1,03	2,62	0,80
YA-4	58,0	0,77	24,86	3,38	1,23	<0,5	2,52	0,14	1,11	0,12	0,32	0,23	9,0	0,66
	52,73	0,71	21,25	2,59	2,63	1,41	3,08	0,91	1,59	0,13	0,35	0,26	13,66	0,50
YA-5	62,97	0,74	23,2	3,38	1,23	<0,5	2,24	<0,03	1,03	0,12	0,5	0,29	6,0	0,44
	60,17	0,72	21,13	3,40	3,39	1,61	2,80	0,72	1,36	0,14	0,52	0,37	6,03	0,40
YA-6	65,0	0,86	28,5	2,27	1,65	<0,5	1,4	0,12	1,19	0,11	<0,1	0,12	0,8	0,44
	63,92	0,84	25,05	2,21	2,71	0,81	2,80	0,69	1,75	0,14	0,16	0,34	0,49	0,30

3-jadval

O‘rganilgan namunalarning asosiy jins hosil qiluvchi komponentlari bo‘yicha (%) kimyoviy tahlil natijalarining o‘rtacha qiymatlari, “MRI” DM va “Markaziy laboratoriya” DK tomonidan amalga oshirilgan

Namunalar nomi	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _{umumiy}	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sum	SO ₃	K.Y.M.	CO ₂
A-1	45,4	0,31	7,37	18,00	21,03	<0,4	2,45	0,29	0,83	0,08	2,36	5,585	14,07	0,36
A-2	49,72	0,52	15,49	4,01	2,29	<1,0	3,22	0,41	0,99	0,09	0,34	0,535	21,75	0,74
A-3	55,34	0,81	22,1	6,58	7,27	<1,16	4,905	0,58	1,25	0,125	0,40	0,935	3,31	0,84
YA-4	55,36	0,74	23,05	2,99	1,93	<0,96	2,8	0,52	1,35	0,125	0,33	0,245	11,33	0,58
YA-5	61,57	0,73	22,16	3,39	2,31	<1,06	2,52	<0,38	1,195	0,13	0,51	0,33	6,01	0,42
YA-6	64,46	0,85	26,77	2,24	2,18	<0,66	2,1	0,40	1,47	0,125	<0,13	0,23	0,64	0,37
O‘rtacha arifmetik ko‘rsatkichlar														
Angren IES	47,56	0,42	11,44	14,59	16,67	0,91	2,84	0,35	0,92	0,09	1,35	3,06	17,91	0,55
Yangi Angren IES	58,47	0,74	22,61	5,20	4,83	1,51	2,66	0,62	1,27	0,13	0,42	0,29	8,67	0,50
Elektrofilter	59,90	0,83	24,44	6,11	6,42	1,31	3,50	0,49	1,36	0,13	0,28	0,58	1,98	0,61

4-jadval

Dastlabki namunalarda alohida metallar miqdori (g/t) massaspektrometrik tahlil (ICP-MS) ma’lumotlariga ko‘ra

Namuna nomi	Fe	Cu	Mo	Sc	Y	Lant.	Au*	Ag	Bi	Te	Pb	W	Sb	Se	Ge*	Tl	Ga*	U
A-1	145000	45,00	49,0	4,75	11,7	83,23	0,015	0,71	0,54	0,25	455,0	26,00	4,60	2,35	14,00	4,15	9,20	4,55
A-2	28000	36,00	19,0	7,75	16,0	123,79	0,016	0,71	0,33	0,12	73,5	22,50	2,90	3,75	3,60	1,40	18,50	7,10
A-3	55500	48,50	14,0	11,00	20,5	150,72	0,011	0,93	0,42	0,11	46,5	12,00	3,75	4,80	5,80	1,45	23,00	11,00
YA-4	21000	39,00	9,3	11,50	20,0	162,37	0,019	0,83	0,44	0,10	46,5	9,20	3,30	2,80	2,65	1,25	23,00	9,75
YA-5	20000	33,00	5,9	7,70	15,5	122,99	0,031	1,25	0,23	0,13	31,0	6,45	22,00	3,25	2,45	0,79	18,00	7,80
YA-6	11500	28,50	4,7	4,70	10,0	55,21	0,012	0,75	0,34	0,08	36,0	4,65	2,90	2,35	1,50	0,92	18,50	7,55

5-jadval

Texnogen chiqindilardagi elementlarning o'rtacha miqdorlari (g/t) va ularning Klark kontsentratsiyalari

Elementlar	Yer qobig'i o'rtacha Klark soni	Angren IES	KK	Yangi Angren IES	KK	Elektrofilter	KK
Fe	46500	86500,0	1,9	20500,0	0,4	33500,0	0,7
Cu	47,0	40,5	0,9	36,0	0,8	38,5	0,8
Mo	1,1	34,0	30,9	7,6	6,9	9,3	8,5
Sc	10,0	6,25	0,6	9,60	1,0	7,85	0,8
Y	20,0	13,9	0,7	17,8	0,9	15,3	0,8
Σ lant.	178,0	103,5	0,6	142,7	0,8	103,0	0,6
Au*	0,0043	0,015	3,5	0,025	5,8	0,012	2,7
Ag	0,07	0,71	10,1	1,04	14,8	0,84	12,0
Bi	0,009	0,44	48,3	0,33	36,7	0,38	42,2
Te	0,001	0,18	182,8	0,11	114,0	0,09	94,0
Pb	16,0	264,3	16,5	38,8	2,4	41,3	2,6
Cd	0,13	0,42	3,2	0,12	0,9	0,16	1,3
W	1,3	24,3	18,7	7,8	6,0	8,3	6,4
Sb	0,5	3,75	7,5	12,65	25,3	3,33	6,7
Se	0,05	3,05	61,0	3,03	60,5	3,58	71,5
Ge*	1,40	8,80	6,3	2,55	1,8	3,65	2,6
Tl	1,00	2,78	2,8	1,02	1,0	1,18	1,2
Ga*	19,0	13,9	0,7	20,5	1,1	20,8	1,1
Pd*	0,013	0,85	65,0	0,91	70,0	0,81	62,3
U	2,5	5,83	2,3	8,78	3,5	9,28	3,7
Re*	0,0007	0,0023	3,3	0,0023	3,2	0,0049	7,0
Pt*	-	0,0018		0,0018		0,0025	
Rh*	-	0,0148		0,0193		0,0171	

Izoh: KK – klark

* elementlar, belgisi bilan belgilanganlar yarim miqdoriy ta'rifga ega

6-jadval

Dastlabki namunalarda selen (Se), tellur (Te) va reniy (Re) miqdori (g/t) kimyoviy tahlil ma'lumotlariga ko'ra ("Markaziy laboratoriya" DK)

Namuna nomi	Cu	Mo	Au	Se	Te	Re
Angren IES	80	32	<0,1	0,7	<1	0,094
Yangi Angren IES	60	43	<0,1	0,5	3	0,089
Elektrofilter	60	90	<0,1	1,1	<1	0,087

Natijalar va muhokama. 2–3-jadvallarda

Angren va Yangi Angren issiqlik elektr stansiyalarining kul-shlak chiqindilaridan olingan texnologik namunalarning kimyoviy tahlil natijalari keltirilgan. Tahlillar natijasida barcha namunalar alyumosilikat tarkibli texnogen xomashyo ekanligi aniqlandi. Jumladan, A-1, A-2 (Angren IES kul-shlak chiqindilari), A-3 (Angren IES elektrofilter kuli), YA-4, YA-5 (Yangi Angren IES kul-shlak chiqindilari) hamda YA-6 (Yangi Angren IES elektrofilter kuli) namunalarida kremniy dioksidi (SiO_2) miqdori mos ravishda 45,40; 49,72; 55,34; 55,36; 61,57 va 64,46%, alyuminiy oksidi (Al_2O_3) esa 7,37; 15,49; 22,10; 23,05; 22,16 va 26,77 % ni

tashkil etdi.

Kimyoviy tahlillar kul-shlak chiqindilari tarkibida sanoat nuqtai nazaridan ahamiyatga ega bo'lgan foydali komponentlar, xususan temir va qoldiq uglerod mavjudligini ko'rsatdi. Qoldiq uglerod miqdori kuydirishdagi massa yo'qotilishi (K.Y.M.) ko'rsatkichi orqali baholandi. Ushbu ko'rsatkich Angren IESning A-1 va A-2 hamda Yangi Angren IESning YA-4 va YA-5 namunalarida nisbatan yuqori bo'lib, mos ravishda 14,07; 21,75; 11,33 va 6,02% ni tashkil etdi.

Temirning eng yuqori miqdori A-1 namunasida kuzatilib, 18,00% ni tashkil etdi. A-2, YA-4 va YA-5 namunalarida temir miqdori mos

ravishda 4,01; 2,99 va 3,39% bo'ldi. Elektrofiltir kuli namunalari (A-3 va YA-6) esa qoldiq uglerod hamda temir miqdorining nisbatan pastligi bilan tavsiflandi. Mazkur namunalarda K.Y.M. mos ravishda 3,31 va 0,645%, temir miqdori esa 6,58 va 2,24% ni tashkil etdi.

4-jadvalda texnologik namunalarning ICP-MS usulida olingan massaspektrometrik tahlil natijalari keltirilgan. Tahlillar "Markaziy laboratoriya" DK kimyo laboratoriyasida bajarildi.

7-jadval

**Dastlabki texnologik namunalarning
granulometrik tarkibi**

Yiriklik sinfi, mm	Chiqish, %					
	A-1	A-2	A-3	YA-4	YA-5	YA-6
+3	10,1	2,2	-	7,7	0,7	-
-3+1,0	1,4	3,9	1,3	5,6	4,6	1,1
-1,0+0,5	5,9	4,8	0,5	4,8	11,1	-
-0,5+0,25	26,7	17,0	0,8	10,5	22,5	0,5
-0,25+0,16	29,4	21,0	5,5	17,4	23,7	13,4
-0,16+0,08	12,8	21,6	26,1	23,3	20,8	43,1
-0,08+0,044	6,7	11,2	7,5	9,6	9,2	10,0
-0,044+0,022	5,56	11,78	49,05	13,11	6,5	21,75
-0,022+0,01	0,71	4,23	6,89	5,06	0,64	7,48
-0,01+0,005	0,33	1,19	1,26	2,03	0,25	1,84
-0,005+0,001	0,18	0,81	0,64	0,88	0,06	0,57
-0,001+0	0,09	0,39	0,51	0,03	0,05	0,18
Jami	100	100	100	100	100	100

5-jadval ma'lumotlariga ko'ra, Angren va Yangi Angren IES kul-shlak chiqindilari tarkibida molibden, vismut, tellur, selen va palladiy kabi qimmatli elementlar mavjudligi aniqlandi. Jumladan, molibden miqdori 34,0 va 7,6 g/t, vismut 0,44 va 0,33 g/t, tellur 0,18 va 0,11 g/t, selen 3,05 va 3,03 g/t, palladiy esa 0,85 va 0,91 g/t ni tashkil etdi. Mazkur elementlarning konsentratsiyasi texnogen xomashyoni kompleks qayta ishlash va ulardan qimmatli komponentlarni ajratib olish istiqbollari mavjudligini ko'rsatadi.

Elementlarning miqdoriy tarkibini A.P. Vinogradovning klark qiymatlari bilan taqqoslash texnogen chiqindilarning geokimyoviy jihatdan istiqbolli xomashyo ekanligini tasdiqlaydi. Shu bilan birga, ularni sanoat miqyosida o'zlashtirish qo'llaniladigan boyitish va metallurgik texnologiyalarning texnik hamda iqtisodiy samaradorligiga bevosita bog'liq.

Namunalarning granulometrik tarkibi.

Texnogen chiqindilarning granulometrik tarkibini aniqlash hamda foydali komponentlarning yiriklik sinflari bo'yicha taqsimlanishini baholash maqsadida elakli tahlil o'tkazildi. Buning uchun namunalardan o'rtacha namunalar ajratilib, ular 12 ta yiriklik sinfi bo'yicha fraksiyalarga ajratildi. Har bir fraksiyaning og'irligi va chiqish miqdori aniqlanib, hisob-kitob natijalari 8-jadvalda keltirilgan. Olingan ma'lumotlar texnologik sxemani tanlash hamda boyitish jarayonlarining optimal parametrlarini belgilash uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

Qolgan uglerod (to'liq kuydirilmagan organik modda) miqdorini yiriklik sinflari bo'yicha aniqlash maqsadida kul-shlak chiqindilari namunalarning alohida fraksiyalari "Snol" laboratoriya pechida 850 °C haroratda, havo almashinuvi cheklanmagan sharoitda 1,5 soat davomida kuydirildi. Belgilangan haroratga erishilgandan so'ng namunalarning massa yo'qotilishi aniqlanib, kuydirishdagi yo'qotish (K.Y.M.) qiymatlari hisoblandi. Olingan natijalar asosida uchuvchan komponentlarning yiriklik sinflari bo'yicha taqsimlanishi baholandi. Tadqiqot natijalari 9-jadvalda keltirilgan.

Granulometrik tarkib texnogen chiqindilarni magnit usulda boyitish samaradorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, mayda dispers nemagnit zarrachalar magnit maydonda magnit fraksiyalar bilan birgalikda ushlanib qoladi. Natijada magnit konsentratining chiqishi ortadi, biroq undagi temir miqdori ma'lum darajada kamayadi. Shu sababli magnit ajratish jarayonida zarracha yirikligini optimallashtirish yuqori sifatli konsentrat olishning muhim omillaridan biri hisoblanadi.

Xulosa. Tadqiqot natijalari Angren va Yangi Angren issiqlik elektr stansiyalarining kul-shlak chiqindilari tarkibida sanoat ahamiyatiga ega bo'lgan foydali komponentlar mavjudligini tasdiqladi. Kimyoviy, mineralogik, granulometrik hamda ICP-MS tahlillari ushbu texnogen xomashyoning alyumosilikat tabiatga ega ekanligini hamda uning tarkibida temir, qoldiq uglerod va ayrim qimmatli elementlarning mavjudligini ko'rsatdi.

O'tkazilgan tadqiqotlar kul-shlak chiqindilarini gravitatsion, magnit va flotatsion boyitish usullari hamda gidrometallurgik texnologiyalar

asosida kompleks qayta ishlash imkoniyatlari mavjudligini ilmiy jihatdan asosladi. Tadqiq etilgan namunalarda radionuklidlar miqdorining amaldagi me'yoriy talablarga mos kelishi ularni ikkilamchi mineral xomashyo sifatida sanoatda qo'llash istiqbollarini yanada oshiradi.

Shunday qilib, Angren va Yangi Angren

issiqlik elektr stansiyalarining kul-shlak chiqindilarini kompleks qayta ishlash qimmatli komponentlarni qayta tiklash, tabiiy mineral resurslardan oqilona foydalanish, texnogen chiqindilar hajmini kamaytirish hamda ekologik holatni yaxshilashga xizmat qiladigan istiqbolli yo'nalishlardan biri hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Снурников, А. П. (1986). Комплексное использование минеральных ресурсов в цветной металлургии. Металлургия.
- [2] Ushbu adabiyotlar APA 7 uslubida, asl tili va kirill alifbosida quyidagicha rasmiylashtiriladi:
- [3] Снурников, А. П. (1986). Комплексное использование минеральных ресурсов в цветной металлургии. Металлургия.
- [4] Санакулов, К. С., & Шеметов, П. А. (2010). Концептуальные основы решения проблем переработки техногенного сырья. Горный вестник Узбекистана, 4(43), 7–11.
- [5] Санакулов, К. С. (2009). Обоснование и разработка технологии переработки отходов горно-металлургических производств (Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук). Навои.
- [6] Санакулов, К. С. (2009). К вопросу обоснования и разработки технологии переработки отходов горно-металлургических производств. Горный вестник Узбекистана, 1(36), 27–38.
- [7] Комаров, М. А., и др. (2007). Горнопромышленные отходы – дополнительный источник минерального сырья. Минеральные ресурсы России, 4, 3–9.
- [8] Джумаев, М. Х. (2003). Прошлое и будущее Такобского месторождения. Горный журнал. Цветные металлы (спец. выпуск), 50–51.
- [9] Каландадзе, О. С., Кереселидзе, Г. П., Чохонелидзе, М. И., & Миронов, В. В. (2004). Квайсинское горно-обогатительное предприятие: рудная база и перспективы развития. Горный журнал, 4, 57–60.
- [10] Кушнаренко, Ю. С. (1996). Гравитационное обогащение твердых полезных ископаемых. В Лабораторные и технологические исследования минерального сырья (Обзор, информ., Вып. 3). АОЗТ «Геоинформ Марк».
- [11] Лесовик, Р. В. (2004). Комплексное использование хвостов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов. Горный журнал, 1, 76–77.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Almatov, I. M., Xatamov, G. A., Botirov, M. S., & G'ulomov, I. I. (2026). Angren va Yangi Angren issiqlik elektr stansiyalari kul-shlak chiqindilaridan olingan texnologik namunalarning moddiy tarkibini tadqiq etish. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.6>

УДК: 622.68:629.33.012.5

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.3

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ШИН КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ И АНАЛИЗ ПРИЧИН ИХ ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО ОТКАЗА В УСЛОВИЯХ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ УЗБЕКИСТАНА



**Истаблаев Февзи
Фератович**

Старший научный сотрудник,
Навоийское отделение Академии
наук Республики Узбекистан,
Навои, Узбекистан
E-mail: fevzi_xkm@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-2808-6566
Science ID: MNV-0726-0100



**Атакулов Лазизжон
Нематович**

Доктор технических наук,
профессор, Навоийский
государственный горно-
технологический университет,
Навои, Узбекистан
E-mail:
atakulov.laziz1978@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-3561-8850
Science ID: DSN-1225-0002



**Жураев Акбар
Шавкатович**

Доктор философии по
техническим наукам (PhD),
доцент, Навоийский
государственный горно-
технологический университет,
Навои, Узбекистан
E-mail:
jurayevakbar1987@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-9154-6698
Science ID: FNV-0525-0049

Аннотация. Статья посвящена эксплуатации крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов в условиях Узбекистана на примере карьера Мурунтау АО «Навоийский ГМК» и объектов АО «Qizilqumsement». Приведен статистический анализ причин преждевременного отказа шин, среди которых естественный износ, механические повреждения и тепловые разрушения. Отмечено, что расходы на замену шин составляют значительную часть себестоимости транспортировки горной массы, а перегрев вызывает отслоение резины и экономические потери. Представлены результаты натурных измерений теплового состояния колес с применением тепловизора и системы K.O.D.A. Установлено, что тепловая нагрузка обусловлена не только солнечной радиацией, гистерезисом, но и теплоотдачей от тормозных механизмов. Выявлены локальные зоны максимального нагрева в шинах. Рассмотрены три подхода решения проблемы, включая регламентированные технологические перерывы, непрерывный TPMS-мониторинг давления и температуры, а также принудительное охлаждение. Сделан вывод о необходимости разработки инновационных систем отвода тепла для повышения ресурса шин.

Ключевые слова: карьерные автосамосвалы, крупногабаритные шины, температурный режим, тепловое разрушение, отслоение резины, тормозная система, колесный диск, тепловизионный контроль, система K.O.D.A., гистерезис, ходимость шин, тонно-километры в час.

Received: 03.07.2026

Accepted: 27.07.2026

Issue publication: 28.09.2026

O'ZBEKISTON TOG'-KON SANOATI KORXONALARI SHAROITIDA KARYER AVTOSAMOSVALLARI KATTA O'LCHAMLI SHINALARINING TEMPERATURA REJIMLARINI TADQIQ ETISH VA ULARNING MUDDATIDAN OLDIN ISHDAN CHIQISH SABABLARI TAHLIL QILISH

**Istablayev Fevzi
Feratovich**

*Katta ilmiy xodim, O'zbekiston
Respublikasi Fanlar akademiyasi
Navoiy bo'limi, Navoiy, O'zbekiston*

**Ataqulov Lazizjon
Nematovich**

*Texnika fanlari doktori, professor,
Navoiy davlat konchilik va
texnologiyalar universiteti, Navoiy,
O'zbekiston*

**Jurayev Akbar
Shavkatovich**

*Texnika fanlari bo'yicha falsafa
doktori (PhD), dotsent, Navoiy
davlat konchilik va texnologiyalar
universiteti, Navoiy, O'zbekiston*

Annotatsiya. Maqola O'zbekiston sharoitida, "Navoiy KMK" AJning Muruntov koni va "Qizilqumsement" AJ obyektlari misolida karyer avtosamosvollarining katta o'lchamli shinalarini ekspluatatsiya qilish masalalariga bag'ishlangan. Shinalarning muddatidan oldin ishdan chiqish sabablari, jumladan, tabiiy yeyilish, mexanik shikastlanishlar va issiqlik natijasida yuzaga keladigan yemirilishlarning statistik tahlili keltirilgan. Shinalarni almashtirish xarajatlari tog' jinslarini tashish tannarxining sezilarli qismini tashkil etishi, me'yorida ortiq qizib ketish esa rezinaning qatlamlarga ajralishiga va iqtisodiy yo'qotishlarga olib kelishi ta'kidlangan. Issiqlik ko'rish kamerasi (teplovizor) va K.O.D.A. tizimi yordamida g'ildiraklarning issiqlik holati taqdim etilgan. Issiqlik yuklamasi nafaqat quyosh radiatsiyasi va gisterezis, balki tormoz mexanizmlaridan uzatiladigan issiqlik oqimi hisobiga ham yuzaga kelishi aniqlangan. Shinalardagi maksimal qizishning lokal zonalarini belgilab berilgan. Muammoni hal qilishning uchta yondashuvi, jumladan, tartibga solingan texnologik tanaffuslar, bosim va haroratning uzluksiz TPMS-monitoringi hamda majburiy sovitish tizimlari ko'rib chiqilgan. Shinalar resursini oshirish uchun innovatsion issiqlik chiqarish tizimlarini ishlab chiqish zarurligi to'g'risida xulosa chiqarilgan.

Kalit so'zlar: karyer avtosamosvollari, katta o'lchamli shinalar, harorat rejimi, issiqlik natijasida yemirilish, rezinaning qatlamlarga ajralishi, tormoz tizimi, g'ildirak diski, issiqlik ko'rish nazorati, K.O.D.A. tizimi, gisterezis, shinalarning yurish resursi (chodimligi), soatiga tonna-kilometr.

INVESTIGATION OF TEMPERATURE REGIMES OF LARGE-SIZE TYRES OF MINING DUMP TRUCKS AND ANALYSIS OF THE CAUSES OF THEIR PREMATURE FAILURE IN THE CONDITIONS OF MINING ENTERPRISES OF UZBEKISTAN

**Istablaev Fevzi
Feratovich**

*Senior Researcher, Navoiy Branch
of the Academy of Sciences of the
Republic of Uzbekistan, Navoiy,
Uzbekistan*

**Ataqulov Lazizjon
Nematovich**

*Doctor of Technical Sciences,
Professor, Navoi State University of
Mining and Technologies, Navoiy,
Uzbekistan*

**Zhuraev Akbar
Shavkatovich**

*Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Associate
Professor, Navoi State University of
Mining and Technologies, Navoiy,
Uzbekistan*

Abstract. The article is devoted to the operation of large-size tyres of mining dump trucks in the specific climatic and mining conditions of Uzbekistan, using the example of the Muruntau open-pit mine of "Navoi MMC" JSC and the facilities of "Qizilqumsement" JSC. A statistical analysis of the causes of premature tyre failure, including normal wear, mechanical damage, and thermal destruction, is presented. It is noted that tyre replacement costs constitute a significant part of the cost of transporting rock mass, while overheating causes rubber delamination and subsequent economic losses. The results of field

measurements of the thermal state of wheels using a thermal imager and the K.O.D.A. system are presented. It is established that the thermal load is caused not only by solar radiation and hysteresis but also by heat transfer from the braking mechanisms through the wheel rim. Local zones of maximum heating in tyres have been identified. Three approaches to solving the problem are considered, including regulated technological breaks, continuous TPMS monitoring of pressure and temperature, and forced cooling. It is concluded that it is necessary to develop innovative heat dissipation systems to increase tyre resource.

Keywords: mining dump trucks, large-size tyres, temperature regimes, thermal destruction, rubber delamination, braking system, wheel rim, thermal imaging control, K.O.D.A. system, hysteresis, tyre durability, tonne-kilometres per hour.

Введение. В горнодобывающей отрасли Узбекистана, как и в мировой практике, ключевыми логистическими решениями остаются конвейерные системы, железные дороги и грузовой автотранспорт. Последний доминирует благодаря своей маневренности и способности эффективно работать на больших уклонах [1, 2, 3, 4].



Рис.1. Автосамосвалы, используемые в карьерах Узбекистана:

а - Komatsu 830E в карьере Мурунтау АО «Навоийский ГМК»; б - Tonly TL875B на территории завода АО «Qizilqumsement»; в - БелАЗ 7547 в карьере Горный АО «Qizilqumsement»; г - поливооросительная техника на базе автосамосвала БелАЗ 7547.

По данным 2025 года в карьере Мурунтау АО «Навоийский ГМК» работало более 170 автосамосвалов марок японской компании Komatsu (рис. 1а), американской Caterpillar, белорусского завода БелАЗ грузоподъемностью от 90 до 254 тонн. Грузовой автопарк горных выработок АО «Qizilqumsement» представлен 15 китайскими Tonly (рис. 1б), 20 белорусскими БелАЗ-7547 (рис. 1в) грузоподъемностью 60 и 45 тонн соответственно, а также 10 самосвалами MAN TGS 33.360 и TGS 41.400 отечественного

производства грузоподъемностью 20 и 30 тонн соответственно. Кроме этого, на предприятиях имеется дорожная, поливооросительная (рис. 1г) и специальная техника.

Экономическая эффективность использования карьерных самосвалов напрямую зависит от ресурса шин, расходы на которые составляют от 25 до 30% и выше от всех транспортных издержек [4, 5, 6, 7]. Годовая потребность шин по АО «НГМК» более 5 тыс. единиц, а доля от общих затрат составляет 19,7% [1]. Повышение ресурса эксплуатации крупногабаритных шин является одним из ключевых направлений снижения общих затрат на автотранспорт.

Литературный анализ и методы.

Причины отказов крупногабаритных шин можно разделить на три основные группы [1, 2]:

1. Износ: естественный (равномерный) (рис. 2а); ускоренный (агрессивный); неравномерный (односторонний, пилообразный);

2. Механические повреждения: сквозной прокол (пробой) протектора (рис. 2б), боковины; несквозное повреждение (порез) протектора, боковины (рис. 2в); разрыв брекерных слоев, каркаса, гермослоя; порез до металлического корда; повреждение борта при перемещении, монтаже и т.п.

3. Тепловые разрушения (рис. 2г): отслоение резины протектора; поражение электрическим током; возгорание (внутреннее, наружное).

Чрезмерный перегрев шин приводит к снижению прочности резины, расслоению каркаса, что вызывает тепловое разрушение и повышает риск разрыва шины [3, 5].

С сентября 2024 года по июль 2025 года на Участок шиномонтажа Цеха ремонта автошин

Управления автомобильного транспорта Центрального рудоуправления АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» в ремонт поступило 138 крупногабаритных шин. Наибольшая частота повреждений зафиксирована в протекторной зоне (рис.3), а проблемы с отслоением из-за теплового разрушения шин - в основном в теплое время года – весной и летом.

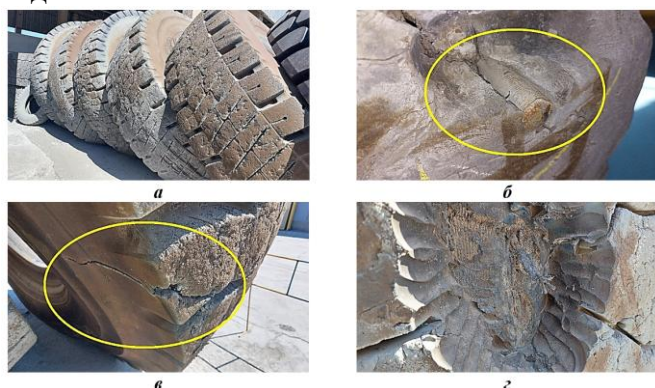


Рис.2. Причины отказа крупногабаритных шин:

а – естественный износ; б и в – механическое повреждение при контакте с посторонними предметами: сквозной прокол протектора и разрыв резины боковины соответственно; г – тепловое разрушение – запекание резины.

Из всех поступивших в указанный период на участок шин 132 отремонтированы с применением германской технологии «Rema Tip Top» и отправлены для дальнейшей эксплуатации, 6 – списаны по причине отслоения. Однако стоит отметить, что это только те шины, такие дефекты в которых обнаружены непосредственно на участке шиномонтажа. Превалирующая доля указанных КГШ подлежит выбраковке уже при первичном осмотре. Так, в УАТ ЦРУ АО «Навоийский ГМК» 13,5% крупногабаритных шин забраковано за первое полугодие 2025 года из-за отслоения по причине теплового разрушения (табл. 1).

При механических повреждениях шина в большинстве случаев ремонтпригодна. В этом случае ресурс шины снижается на 10–25%. Однако тепловые разрушения приводят к резкому снижению ресурса до 40% [1, 2]. Данный вид повреждения практически всегда является необратимым и не подлежит ремонту,

что обусловлено значительным нарушением структуры резины и риском дальнейшего разрушения при эксплуатации.

Естественный износ шин во многом зависит от состояния дорог (твердость пород, их фракция), маршрута (уклон, углы поворота), нагрузки (вес и габариты транспортируемого груза), погодных условий (дождь, снег, гололед), а отсутствие или уменьшение числа механических повреждений обусловлено антропогенным фактором, а именно - квалификацией водителя и соблюдением им правил техники безопасности, дорожного движения и технической эксплуатации автотранспортных средств. Другими словами, эти две причины отказов крупногабаритных шин в большей мере требуют решения организационных вопросов, в том числе выбора шин, в которых состав и структура резины соответствует условиям эксплуатации.



Рис.3. Статистика по крупногабаритным шинам, поступившим в ремонт на Участок шиномонтажа Цеха ремонта автошин УАТ ЦРУ НГМК с сентября 2024 года по июль 2025 года.

Вышеперечисленные факторы, влияющие на срок службы КГШ, хорошо изучены многими исследователями, в том числе из Узбекистана [1, 2] и стран СНГ [8, 9]. В своих работах они опирались на расчет ТКВЧ (тонно-километры в час) – показателю производительности шины, который выражает суммарный вес груза, который она способна воспринимать при заданной скорости. При этом они тепловую нагрузку указали как одну из причин преждевременного износа шин, ведь ТКВЧ, в том числе, зависит от максимально разрешенной внутренней рабочей температуры шины [1, 10]. Однако данное направление требует более детального исследования, в том числе изучения причин и путей передачи тепла, а также поиска методов решения данной проблемы.

Таблица 1.
Информация по причинам списания КГШ в УАТ ЦРУ АО «НГМК» за первое полугодие 2025 года

№	Маркировка (размер) шины	Причины списания (в процентах)			Примечание
		Естественный износ	Механические повреждения	Тепловое разрушение (отслоение)	
1	40.00R57 46/90R57	58	30	12	Всего списано 622 шины
2	50/80R57 1200/90R57	53	32	15	
Среднее значение		55,5	31	13,5	

Согласно литературному обзору [1, 11] нагрев воздуха внутри шины свыше 85°C считается критическим. При достижении внутренней температуры 110°C начинается пиролиз резины - выделение горючих газов (метан, водород), что ведет к резкому росту давления и риску взрыва. Одни исследователи утверждают, что установившаяся температура самой шины, то есть резинового корда, не должна превышать 100°C [12, 13], другие отмечают, что для современных бескамерных шин критичной считается температура 110-120°C и выше [9, 14, 15]. При более высоких температурах шина разрушается вследствие снижения прочности корда и его связи с резиной.

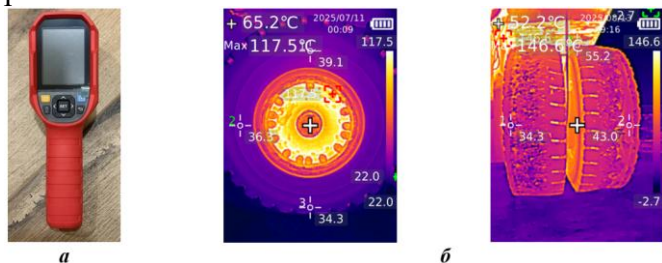


Рис.4. Внешний вид тепловизора (а) и пример демонстрации показаний в инфракрасном диапазоне (б).

Для изучения ситуации в реальных условиях Узбекистана проведены наблюдения за работой автосамосвалов и измерения температуры используемых в них КГШ. Внешняя температура шин измерена с использованием тепловизора UNI-T Uti260B (рис.4), а температура и давление воздуха внутри них зафиксированы по данным системы К.О.Д.А. (комплексная обработка данных автошины) - специализированный комплекс мониторинга давления и температуры шин (TPMS) (рис.5).

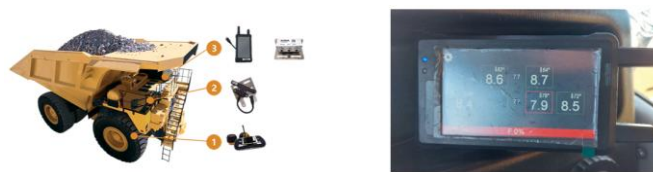


Рис.5. Дистанционный датчик давления и температуры К.О.Д.А:

а – внешний вид; б – вывод показаний давления (бар) и температуры (°C) на дисплей в кабине автосамосвала.

Результаты. В ходе наблюдений и измерений получены данные, представленные на рис. 6-12. Здесь измерения показаний с шин автосамосвалов Tonly (грузоподъемность – 60 тонн) и БелАЗ (45 тонн) произведены на территории завода и карьеров АО «Qizilqumsement», а автосамосвалов Komatsu (221,6 и 254 тонны) и Caterpillar (232 тонны) – на карьере Мурунтау АО «Навоийский ГМК». На цементном заводе измерения производились в дневное и ночное время суток, а на крупнейшем в мире золоторудном месторождении – днем. Система К.О.Д.А. была установлена только на автосамосвалах НГМК.

Буквенные обозначения на рис. 6-12: первая «П» и «З» соответственно «передняя» и «задняя»; последняя «П» и «Л» - правая и левая; «Н» и «В» - наружная и внутренняя у сдвоенных шин.

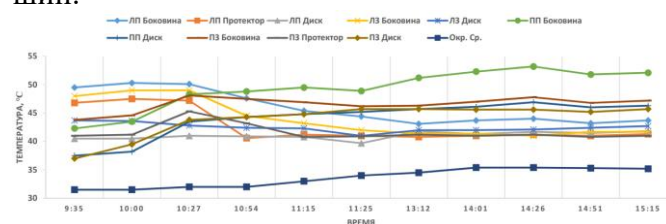


Рис.6. Температура колес с шинами Techking 14.00R25 на автосамосвале Tonly TL875B (день).

Обсуждение. Анализ наблюдений и данных по измерениям позволяет сделать следующие выводы:

1. Диски и шины на передних колесах БелАЗов в карьере Горный АО «Qizilqumsement» нагреваются выше, чем на задних. Максимально зафиксированная температура на дисках – 117,5°C (рис. 4б и 7). При этом измерения сделаны в ночное время, что исключает фактор воздействия прямых солнечных лучей.

На автосамосвалах в карьере Мурунтау по данным тепловизора температура дисков на передних колесах ниже, чем на задних, однако по данным датчиков температура воздуха внутри шин выше обычно на передних (рис.10-12). Такие же данные получены при измерении температуры шин автосамосвалов Tonly в карьере Горный АО «Qizilqumsement» (рис.9).

Отсюда можно предположить, что на передних шинах часть тепла генерируется из-за работы тормозной системы и оно аккумулируется в воздухе внутри шины. При этом задние колеса сдвоенные, а, соответственно, накопленное тепло из воздуха внутри шин забирается интенсивнее в окружающую среду, в том числе через обод колесного диска.

2. Нагрев шин естественным образом связан с нагрузкой. Логично предположить, что задние шины из-за того, что на них ложится основная часть веса перевозимого груза, должны нагреваться выше, однако измерения температуры крупногабаритных шин в карьере Мурунтау (рис. 10–12), как тепловизором, так и датчиком давления и температуры системы K.O.D.A. показали обратное, что подтверждает вывод о воздействии работы тормозной системы.

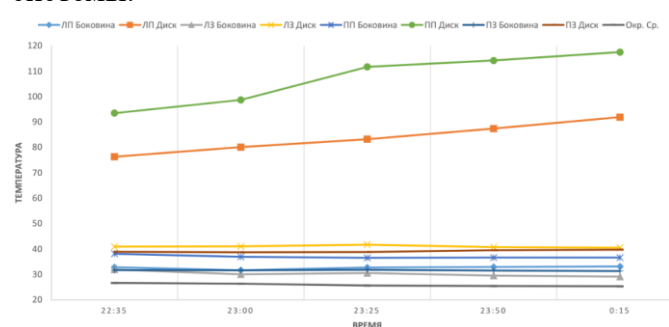


Рис.7. Температура колес с шинами Techking 21.00R35 на автосамосвале БелАЗ 7547 (ночь, плечо 2 км, трасса с уклонами).

3. На автосамосвалах Tonly в ходе наблюдений и измерений в дневное время в АО «Qizilqumsement» при перевозке груза значительных различий в температуре шин и дисков не зафиксировано (рис.6). Такое стало возможным из-за стечения трех факторов: небольшое расстояние перевозки, относительно долгое стояние при загрузке и наличие

резиновой камеры между шиной и ободом колесного диска.

Отсутствие резких скачков температуры в шинах при небольшом плече транспортирования на прямолинейном участке также подтвердили измерения на автосамосвале БелАЗ (рис.8).

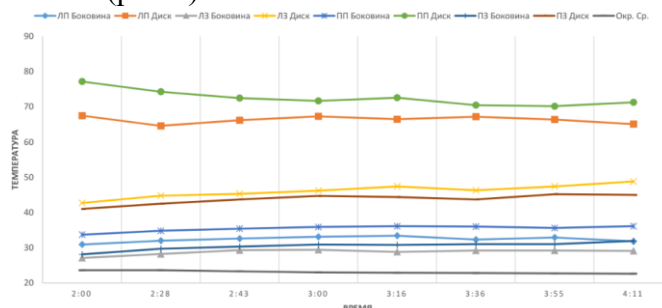


Рис.8. Температура колес с шинами Techking 21.00R35 на автосамосвале БелАЗ 7547 (ночь, плечо 0,5 км, трасса прямолинейная).

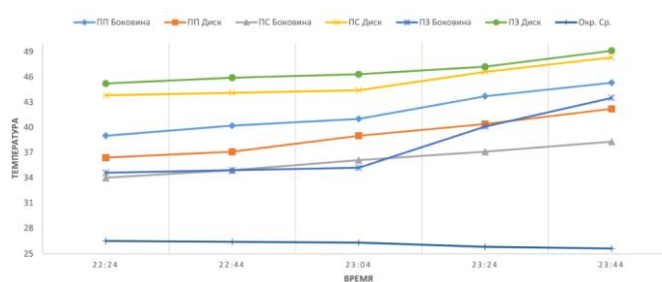


Рис.9. Температура колес с шинами Techking 14.00R25 на автосамосвале Tonly TL875B (ночь, плечо 2 км, трасса с уклонами).

4. Согласно исследованиям [8] наибольшее количество теплоты, отнесенное к единице объема, при движении автосамосвала, то есть от явления гистерезиса, выделяется в середине брекерного слоя крупногабаритной шины и на краях брекера, а общая величина теплообразования в шине распределяется по ее основным элементам в среднем так: протектор (включая подканавочный слой) - около 50%, каркас от 12 до 33%, брекерный слой - от 7 до 15%, боковины и примыкающий к ним борт от 5 до 25%.

Наши наблюдения и эксперименты показали, что температура протектора на шинах в среднем на 4-10°C ниже, чем боковины. Такая же разница в температуре в шинах на солнечной стороне и в тени. Таким образом, температура от грунта шине передается незначительно, тогда

как от прямого попадания солнечного света и нагрева дисков теплопередача, а, соответственно, и нагрев шин происходит интенсивнее.

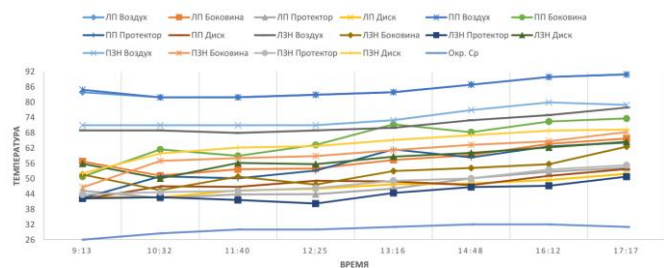


Рис.10. Температура колес с шинами GoodYear 46/90R57 на автосамосвале Komatsu 830E.

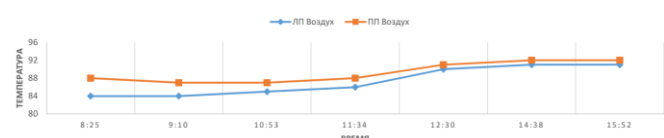


Рис.11. Температура колес с шинами Bridgestone 50/80R57 на автосамосвале Komatsu 860E.

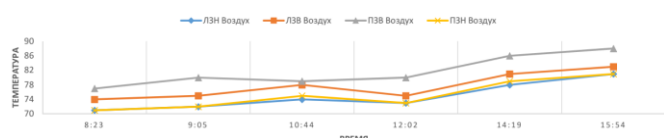


Рис.12. Температура колес с шинами Michelin 40.00R57 на автосамосвале Caterpillar 793D.

5. В конструкции шины наибольший нагрев происходит в месте перехода боковины к протектору, то есть в плечевой зоне (рис.13а), а также в посадочной поверхности борта (рис. 13в). Именно в этих частях шины происходят попеременное сжатие и растяжение резины, что приводит к генерации тепла. Это также подтверждают исследования Волгоградского государственного технического университета и Махачкалинского филиала МАДИ (рис.13б). Они провели эксперименты на шинах легковых автомобилей. По их данным наиболее высокая температура при движении наблюдается обычно в зоне брекера посередине беговой дорожки и в плечевых зонах шины [15].

6. Температура колесных дисков и шин растет или снижается прямо пропорционально, то есть установлена зависимость температуры шины и диска.

7. Установлено, чем больше диаметр шины, тем она нагревается медленнее и также медленнее остывает. Нагрев происходит медленно, так как огромная масса резины крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов и воздуха внутри способна аккумулировать много тепла. Остывают эти шины медленно из-за низкой теплопроводности резины и высокой удельной теплоемкости, а также из-за отсутствия активного обдува на низких скоростях. К примеру, по данным исследователей [1, 2], в карьере Мурунтау максимальная скорость движения автосамосвалов 32-45, а средняя – 15-18 км/ч.

8. Чем больше расстояние перевозки, то есть плечо, тем интенсивнее нагрев шин. Это подтверждают исследования и других авторов [1, 2].

Также этот показатель зависит от уклона дорог: чем он выше, тем чаще работает тормозная система, соответственно, тепло от нагрева тормозного диска через ступицу передается колесному диску, а от него уже шине и воздуху внутри нее (рис. 7 и 8).

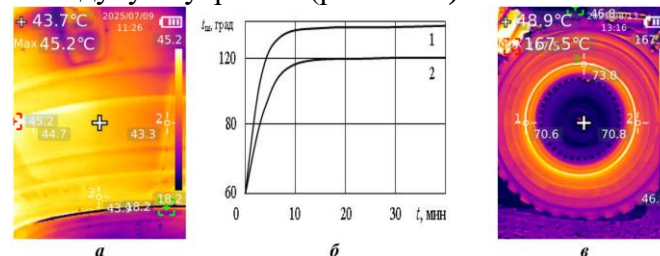


Рис.13. Точки наибольшего нагрева в шинах:

а – измерения, проведенные на шине TECHKING 14.00R25, установленной на автосамосвале Tonly TL875B (температура боковины – 43,3°C, плечевой зоны – 45,2°C); б – зависимость температуры шины от времени качения колеса по барабану: 1 – температура в плечевой зоне шины; 2 – температура воздуха в камере; в – измерения, проведенные на шине GoodYear 46/90R57, установленной на автосамосвале Komatsu 830E (наибольшая температура боковины в месте перехода к посадочной поверхности борта – 73,0°C).

9. При температуре окружающего воздуха свыше 40°C объекты под прямыми лучами Солнца могут нагреться до 60÷70°C, а если они черного цвета – еще выше. При этом температура отдельных участков шины, освещенных солнцем, может увеличиваться на 10-15°C по сравнению с поверхностью шины, находящейся в тени [8]. К примеру, в ходе наблюдений в

карьеру Горный АО «Qizilqumsement» измерения температуры колес БелАЗ 7547 на стоянке, показали нагрев боковины шины до 68,3°C, а диска – до 75,7°C при температуре воздуха 41,3°C.

Перевод работы автосамосвалов на ночные смены исключает воздействие солнечной радиации, соответственно, это снижает риск перегрева крупногабаритных шин во время работы. На примере автосамосвала Tonly видно, несмотря на то, что плечо перевозки в ночное время составляло около 2 км и маршрут был с уклонами, а в дневное – около 1 км на прямолинейном участке, температура шин была практически одинаковой, то есть приращение температуры от солнечной радиации днем было таким же, как от работы тормозной системы ночью, если считать, что нагрев из-за деформации резины при движении (гистерезис) оставался константой.

10. Полив водой шин может способствовать их охлаждению, однако данная операция должна проводиться на регулярной основе. Это подтверждают данные по полево-оросительной технике на базе автосамосвала БелАЗ 7547, однако данная теория требует более детального изучения с оценкой преимуществ данного метода и возможных рисков.

11. Работа автосамосвалов без остановки приводит к тому, что температура воздуха внутри шин на начало рабочей смены составляет около 70°C на задних и свыше 80°C на передних шинах, что неизбежно приводит к их перегреву и тепловому разрушению.

12. Повышение температуры ведет к повышению давления внутри шин. В этом случае наблюдается снижение амортизирующей способности покрышки и рост ударных нагрузок, увеличение напряжений в каркасе, что ускоряет процессы его старения. Повышение удельного давления на опорную поверхность вызывает ускоренный износ протектора в центральной части [1, 2, 8].

Заключение. Таким образом, эксплуатация карьерных самосвалов в грузе состоянии, особенно при длительном воздействии нагрузок, движении по уклонным участкам и при повышенной температуре окружающей среды (свыше 30°C), сопровождается интен-

сивным тепловыделением и перегревом шин [3, 5]. Данный процесс ускоряет износ, способствует расслоению, сокращает срок службы шин и может приводить к их преждевременному отказу. В отдельных случаях перегрев достигает критических значений, вызывая разрушение шин, сопровождаемое возгоранием или взрывом. Подобные инциденты обуславливают значительные экономические потери, длительные простои техники и существенные затраты на восстановительные работы. В этой связи разработка эффективных мер по снижению риска перегрева шин в условиях горнодобывающих предприятий представляется актуальной научно-технической задачей.

Признаками перегрева шин могут быть отслоение резины в области протекторной части (рис.14а), разрыв боковины шины давлением изнутри (рис.14б), микротрещины и вздутие на посадочной поверхности борта (рис.14в и 14г), что свидетельствуют о перегреве диска колеса. Шины в первых двух случаях не подлежат ремонту, оставшиеся требуют пристального контроля и также нежелательны в дальнейшей эксплуатации.

Проблема в том, что микротрещины и «шишки», появляющиеся изнутри КГШ, можно обнаружить только после снятия шины. Сквозные проколы регистрируются непосредственно по факту падения давления в ней.

Есть три возможных пути решения проблемы. Первый – это соблюдение режимов работы и остановки [5]. Согласно регламентам заводов-изготовителей (в частности, ОАО «Белшина»), поддержание работоспособности пневматических шин требует соблюдения технологических перерывов для снижения их температурного градиента. Нормативы предписывают приостановку эксплуатации транспортного средства на 30 минут через каждые 80 км пробега или 2 часа непрерывной работы, либо на 60 минут после 4-часового цикла эксплуатации [11].

Однако в текущих экономических реалиях реализация данных рекомендаций сопряжена с рядом критических факторов. Во-первых, останов карьерных самосвалов провоцирует непроизводительные простои техники, что

негативно сказывается на технико-экономических показателях горнодобывающего предприятия. Во-вторых, в условиях жаркого аридного климата интенсивность конвективного теплообмена резины с атмосферой низкая, что нивелирует эффективность пассивного охлаждения. При этом расширение парка техники для ротации самосвалов на период их отстоя требует значительных инвестиций и ведет к росту себестоимости добычи.

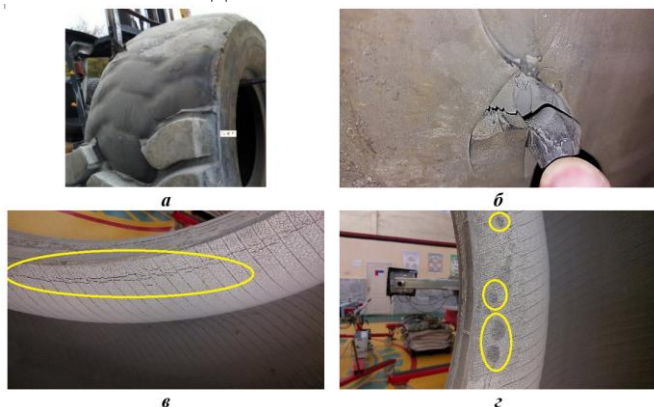


Рис.14. Признаки перегрева шины:

а – отслоение резины в области протекторной части; б – разрыв боковины шины давлением изнутри; в и г – микротрещины и вздутие на посадочной поверхности борта.

Второй путь – это контроль температуры шины или воздуха в ней [5]. Это можно сделать, внедрив тепловизионный контроль наружной температуры шины [15], либо, установив автоматические датчики давления и температуры, что уже сделано на некоторых автосамосвалах, эксплуатируемых в карьере Мурунтау (рис. 5).

При достижении критической температуры необходимо произвести останов автосамосвала. Как альтернативный вариант можно рассмотреть спуск и повторное накачивание воздуха в перегретые шины. Однако этот вариант приемлем, если станции по закачиванию воздуха расположены относительно недалеко от карьера. Если это не так, процесс можно улучшить, предварительно охладив,

выходящий из компрессорной установки воздух.

Третий путь – применение методов и технологий по предотвращению перегрева крупногабаритных шин карьерных самосвалов, в том числе, разработкой систем охлаждения или вывода тепла из шины.

Существует совокупность факторов, определяющих тепловое состояние шин, способствующих отслоению протектора и гермослоя, а также повышающих вероятность их возгорания. Помимо аварийных ситуаций [1], обусловленных нарушением требований техники безопасности (поражение электрическим током, пожары и др.) и правил дорожного движения (дорожно-транспортные происшествия с участием карьерных автосамосвалов), в условиях штатной эксплуатации данные факторы целесообразно классифицировать на три основные группы:

1. Нагрев из-за деформации резины при движении (гистерезис);
2. Влияние окружающей среды – солнечная радиация;
3. Тепловое воздействие тормозных механизмов.

Как отмечено выше, первая и вторая группы факторов получили достаточно широкое освещение в научной литературе, тогда как третья изучена недостаточно.

Критический нагрев тормозных дисков (до 500°C и выше) способен передаваться на шину через ступицу, колесный диск и воздушную среду внутри колеса. Это приводит к повышению внутреннего давления, увеличению термомеханических напряжений, снижению износостойкости и, в экстремальных условиях, к разрушению шины.

Для проверки этой гипотезы планируется проведение стендовых испытаний шин легкового автомобиля с имитацией нагрева от солнечной радиации и работы тормозной системы. Для чистоты эксперимента будет исключена первая группа факторов, то есть на шину не будет накладываться нагрузка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Исраилов, М. Э. (2025). Совершенствование методики расчета фактического показателя ТКВЧ крупногабаритных шин (Диссертация кандидата технических наук). Ташкент.

- [2] Юсупов, У. Б. (2024). Методология прогнозирования ресурса шин автотранспорта в карьерных условиях (Диссертация доктора технических наук). Ташкент.
- [3] Истаблаев, Ф. Ф., & Атакулов, Л. Н. (2025). Обзор и анализ факторов перегрева крупногабаритных шин. Горные машины и технологии, (2), 21–28.
- [4] Истаблаев, Ф. Ф., Атакулов, Л. Н., & Хайдаров, Ш. Б. (2025). Обзор и анализ методов ремонта крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов. Цифровые технологии в промышленности, 3(2), 81–90. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.3.2.2025.15>
- [5] Истаблаев, Ф. Ф., Атакулов, Л. Н., & Мадатов, Т. А. (2025). Обзор и анализ методов контроля температурного режима эксплуатации крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов. Development of Science, 1(6), 9–20.
- [6] Горюнов, С. В. (2013). Функциональная модель прогнозирования долговечности шин карьерных автосамосвалов. Известия МГТУ «МАМИ», 1(2), 149–154.
- [7] Мухитдинов, А. А., & Юсупов, У. Б. (2023). Оценка влияния продольного уклона карьерных дорог на ресурс крупногабаритных шин. Механика ва технология илмий журналы, (2), 92–103.
- [8] Горюнов, С. В. (2021). Разработка методики прогнозирования долговечности крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов (Диссертация кандидата технических наук). Кемерово.
- [9] Кульпин, А. Г., Стенин, Д. В., & Кульпина, Е. Е. (2017). Исследование потока отказов крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов. Вестник Кузбасского государственного технического университета, (6), 162–167.
- [10] Юсупов, У., Нарзиев, Ж., & Зафаров, К. (2022). Особенности эксплуатации крупногабаритных шин для технологического транспорта. Oriental Journal of Technology and Engineering, 2, 20–29. <https://doi.org/10.37547/supsci-ojte-01-01-04>
- [11] ОАО «Белшина». (2024). Руководство по эксплуатации карьерных и промышленных шин радиальной и диагональной конструкции (РЭ ГИУЛ 22.07-2024).
- [12] Grinchuk, P. S., & Fisenko, S. P. (2016). Rate of dissipation of the energy of low-frequency mechanical disturbances in a tire. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 89(6), 1358–1364.
- [13] Умирзоков, А. М., Саибов, А. А., и др. (2018). Классификация факторов, влияющих на пробег шин в условиях высокогорных карьеров. Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования, (3), 44–51.
- [14] Боханцев, Т. Ф., & Подгорный, А. И. (2024). Проблемы ходимости шин: влияние температуры, качества, веса и давления на эксплуатационные характеристики. Вестник науки, 2(11), 1187–1191.
- [15] Galatia, D. (2020). Investigating the cause of premature tyre failure of open pit mine dump trucks: A case of ABC Mine, Northeast Africa. International Journal of Novel Research in Engineering and Science, 7(1), 20–42.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Истаблаев, Ф. Ф., Атакулов, Л. Н., & Жураев, А. Ш. (2026). Исследование температурных режимов крупногабаритных шин карьерных автосамосвалов и анализ причин их преждевременного отказа в условиях горнодобывающих предприятий Узбекистана. Цифровые технологии в промышленности, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.3>

UDC: 662.9:532.517.4

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.11

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

CFD MODELING OF THE AEROHYDRODYNAMIC BEHAVIOR OF BIOMASS PYROLYSIS LIQUID AND AIRFLOW IN A COMBUSTION CHAMBER



**Davlonov Khayrulla
Allamuratovich**

PhD, Prof., Karshi State Technical
University, Karshi, Uzbekistan
E-mail: davlonov80@mail.ru
ORCID ID: 0000-0001-7444-9853
Science ID: FQD-0825-0058



**Uzboev Maftun
Dusiyarovich**

Karshi State Technical University,
Karshi, Uzbekistan
E-mail: maftunuzboev@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-7444-9853
Science ID: MSN-0726-0094



**Toshmamatov Bobir
Mansurovich**

PhD, Ass. Prof., Karshi State
Technical University, Karshi,
Uzbekistan
E-mail:
bobir.toshmamatov@kstu.uz
ORCID ID: 0000-0001-7051-5307
Science ID: MSD-0825-0028

Abstract. This study presents a numerical investigation of the aerohydrodynamic interaction between a liquid alternative fuel derived from biomass pyrolysis and airflow inside the combustion chamber of a power generation system. A two-dimensional computational model was developed in COMSOL Multiphysics using the finite element method. The turbulent motion of the airflow supplied to the combustion chamber was described using the Navier-Stokes and continuity equations together with a standard turbulence model, whereas the motion of the biomass pyrolysis liquid droplets was represented using a Lagrangian particle-tracking approach. The computational domain was discretized using free triangular elements. The numerical results demonstrated that optimizing the pyrolysis-liquid injection velocity, droplet diameter, inlet-flow ratio, and outlet-channel configuration can enhance mixing intensity, reduce the fraction of droplets impinging on the chamber walls, and facilitate the efficient organization of the fuel combustion process.

Keywords: biomass pyrolysis, pyrolysis liquid, combustion chamber, CFD modeling, finite element method, multiphase flow.

Received: 21.07.2026

Accepted: 15.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТИ БИОМАССЫ И ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

**Давлонов Хайрулла
Алламуратович**

PhD, проф. Каршинский
государственный технический
университет, Карши,
Узбекистан

**Узбоев Мафтун
Дусиярович**

Соискатель, Каршинский
государственный технический
университет, Карши,
Узбекистан

**Тошмаматов Бобир
Мансурович**

PhD, доц. Каршинский
государственный технический
университет, Карши,
Узбекистан

Аннотация. В данной работе выполнено численное моделирование аэрогидродинамического взаимодействия жидкого альтернативного топлива, полученного в результате пиролиза биомассы, и воздушного потока в камере сгорания энергетической установки. Двумерная расчетная модель разработана в программном комплексе COMSOL Multiphysics с использованием метода конечных элементов. Турбулентное движение подаваемого в камеру сгорания воздушного потока описывалось уравнениями Навье-Стокса, неразрывности и стандартной моделью турбулентности, тогда как движение капель пиролизной жидкости - методом отслеживания частиц в лагранжевой постановке. Расчетная область была дискретизирована свободными треугольными элементами. Полученные результаты показали, что оптимизация скорости распыливания пиролизной жидкости, диаметра капель, соотношения входных потоков и конструкции выходных каналов позволяет повысить интенсивность смешения, уменьшить долю капель, осаждающихся на стенках, и обеспечить эффективную организацию процесса сжигания топлива.

Ключевые слова: пиролиз биомассы, пиролизная жидкость, камера сгорания, CFD моделирование, метод конечных элементов, многофазное течение.

BIOMASSA PIROLIZ SUYUQLIGI VA HAVO OQIMINING YONISH KAMERASIDAGI AEROGIDRODINAMIK HOLATINI CFD MODELLASHTIRISH

**Davlonov Xayrulla
Allamuratovich**

t.f.f.d., prof. Qarshi dalat texnika
universiteti, Qarshi, O'zbekiston

**Uzboyev Maftun
Dusiyarovich**

Tadqiqotchi, Qarshi dalat texnika
universiteti, Qarshi, O'zbekiston

**Toshmamatov Bobir
Mansurovich**

T.f.f.d., dots. Qarshi dalat texnika
universiteti, Qarshi, O'zbekiston

Annotatsiya. Ushbu tadqiqot ishida biomassa pirolizi asosida olingan suyuq muqobil yoqilg'i va havo oqimining energetik qurilmalar yonish kamerasidagi aerogidrodinamik ta'siri sonli modellashtirildi. Tadqiqot jarayonida ikki o'lchamli hisoblash modeli COMSOL Multiphysics dasturida chekli elementlar usuli asosida amalga oshirildi. Yonish kamerasiga uzatilgan havo oqimining turbulent harakati Navye-Stoks, uzluksizlik hamda standart turbulentlik tenglamalari asosida, biomassa piroliz suyuqligi tomchilarining harakati esa Lagranj zarrachalarni kuzatish usuli yordamida tavsiflandi. CFD modellashtirish natijasida olingan natijalar biomassa pirolizi suyuqligini yonish kamerasiga purkash tezligi, tomchi diametri, kirish oqimlari nisbati va chiqish kanallari konstruksiyasini optimallashtirish orqali aralashish intensivligini oshirish, devorga uriladigan tomchilar ulushini kamaytirish, yoqilg'ini yonish jarayonini samarali tashkil etish mumkinligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: biomassa pirolizi, piroliz suyuqligi, yonish kamerasi, CFD modellashtirish, chekli elementlar usuli, ko'p fazali oqim.

Introduction. Currently, due to the depletion of traditional fossil fuel and energy resources in the world, the increasing costs associated with their extraction, as well as the increasing emissions of greenhouse gases and harmful compounds resulting from the combustion of fuels, interest in the creation of energy-saving technologies based on renewable energy sources has increased significantly. Such energy sources include solar, wind, biomass energy and other natural sources [1-4]. In particular, alternative fuels obtained from biomass - gaseous

(pyrolysis gas), liquid (bioethanol, biodiesel and pyrolysis liquids) and solid (pyrolysis coal) - are recognized as environmentally friendly, renewable and promising sources for ensuring energy independence. At the same time, the development and use of alternative fuels based on biomass plays an important role in reducing greenhouse gas emissions, reducing the volume of biomass waste, effectively using local energy resources, and strengthening the country's energy security and export potential [5].

Methods. In this research work, the authors studied the aerodynamic and thermal-physical processes in the combustion chamber of pyrolysis gas, pyrolysis liquid, and “water-coal” alternative fuels obtained from biomass pyrolysis.

In the research process, the aerodynamic properties of pyrolysis gas, pyrolysis liquid, and “water-coal” alternative fuels obtained from biomass pyrolysis were studied using computer and CFD modeling methods.

Aerodynamic, thermal-physical and mass transfer processes occurring in the combustion chamber of pyrolysis gas, pyrolysis liquid and “water-coal” alternative fuels obtained from biomass pyrolysis are one of the main factors determining the combustion efficiency, flame stability and heat of fuels. Modern numerical modeling methods are used to study the flow of air supplied to organize the combustion process in the combustion chamber of power plants, the flow of pyrolysis gas, the spraying of pyrolysis liquid and “water-coal” fuels, the evaporation of droplets, the transport of coal particles and their interaction with laminar and turbulent flow.

Analytical methods in the analysis of fuel combustion processes can be used only for simple structures and simplified physical conditions. However, since the processes of spraying alternative fuels, especially “water-coal” alternative fuels obtained from biomass pyrolysis, the formation of multiphase flow, evaporation of droplets, as well as the mixing of alternative fuels with laminar and turbulent air flow are complex and multiphase, analytical methods cannot fully describe such processes. This method allows the determination of the velocity field, pressure pulsation, turbulence, temperature field, combustion process and spatial distribution of component concentrations in the combustion chamber of power devices by numerically solving the Navier-Stokes equations and the laws of conservation of matter and energy. This method analyzes the motion of sprayed liquid alternative fuel droplets, their evaporation, and their interaction with the carrier gas or air flow with high accuracy [6-8].

Results. This approach allows for reliable modeling of combustion processes in various phase states (solid, liquid and gaseous) of alternative fuels obtained based on biomass pyrolysis and was

chosen as the most effective calculation method for assessing the combustion efficiency of “water-coal fuel” obtained based on biomass pyrolysis in energy devices.

Figure 1 below presents a two-dimensional geometric model of the combustion chamber of the “water-coal” alternative fuel prepared based on biomass pyrolysis products and a finite element mesh diagram of the computational domain.

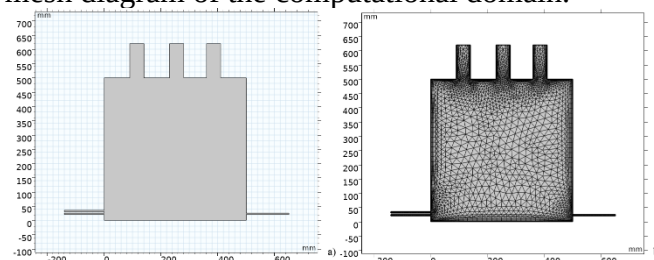


Fig.1. Computational model of the combustion chamber:

a- two-dimensional geometric model of the combustion chamber, b- finite element mesh of the computational domain.

In Figure 1, the two-dimensional geometric model of the combustion chamber under study was discretized using the finite element method. The computational domain was divided into a mesh using free triangular elements adapted to the dynamics of alternative fuels problems obtained based on biomass pyrolysis using the COMSOL Multiphysics software package. When creating the finite element mesh, the maximum element size was 25 mm, the minimum size was 3 mm, the maximum element size growth factor was 1.35 and the curvature coefficient was 0.3, and the degree of definition of narrow geometric domains was taken as 2. Air and alternative fuels obtained based on biomass pyrolysis are transmitted through channels installed on the lower sides of the combustion chamber. As a result, the fuel-air mixture formed inside the combustion chamber is discharged through three channels installed in the upper part.

The geometric parameters for a two-dimensional model of the combustion chamber, built using the COMSOL Multiphysics software package, are listed in Table 1 below.

To numerically model the aerodynamic and hydrodynamic behavior of the flow inside the combustion chamber, we use the law of conservation of mass and momentum and the $k-\varepsilon$

turbulent flow model. We perform the numerical modeling of the process in the time-dependent mode in the following order.

Table 1.

Geometric parameters of the combustion chamber

No	Parameter name	Designation	Unit	Value
1.	Combustion chamber width	A	500	mm
2.	Combustion chamber height	H	500	mm
3.	Inlet channel width	A_{in}	150	mm
4.	Inlet channel height	H_{out}	10	mm
5.	Outlet channel width	A_{in}	50	mm
6.	Outlet channel height	H_{out}	120	mm

To determine the velocity field, pressure distribution, flow acceleration and direction of the gas flow in the combustion chamber, we use the following equation.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F \quad (1)$$

where, ρ – gas density, $\frac{kg}{m^3}$; $\frac{\partial u}{\partial t}$ – rate of change of gas flow velocity over time, $\frac{m}{s^2}$; u – gas flow velocity vector, m/s ; ∇ – spatial differential operator, $1/m$; pI – represents the effect of pressure in all coordinate directions, Pa; K – molecular and turbulent viscosity stress tensor $K = (\mu + \mu_T) \cdot [\nabla u + \nabla u^T]$, $\frac{kg}{(m \cdot s^2)}$; F – volumetric force vector acting on the gas, $\frac{kg}{(m^2 \cdot s^2)}$; μ – dynamic viscosity coefficient, $Pa \cdot s$; μ_T – turbulent dynamic viscosity coefficient $\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $Pa \cdot s$.

We use the continuity equation to ensure that the substance in the combustion chamber is conserved.

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

To determine in which parts of the combustion chamber turbulent mixing is strong or weak, we use the following turbulent kinetic energy equation.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + Q_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

where, k – turbulent kinetic energy, m^2/s^2 ; σ_k – diffusion coefficient of turbulent kinetic energy; ∇k – turbulent kinetic energy gradient, m/s^2 ; P_k – turbulent kinetic energy generation capacity $Q_k = \mu_T \cdot [\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T)]$, W/m^3 ; ε – turbulent kinetic energy dissipation rate, m^2/s^3 .

We can determine how quickly turbulent vortices in a combustion chamber decay and how much turbulent energy is lost using the turbulent dissipation equation. This equation allows us to determine the rate ε at which turbulent kinetic

energy is converted into heat due to molecular friction.

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} Q_k - C_{\varepsilon 2} \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad (4)$$

To solve differential equations 1-4 by numerical modeling, we determine the special solutions and boundary conditions at the inlet, outlet and wall boundaries of the combustion chamber. We perform the calculations based on the finite element method of the time-dependent behavior COMSOL Multiphysics software package.

We enter the values of the gas acquisition program $u=u_{in}$, turbulent kinetic energy $k=k_{in}$ and dissipation process $\varepsilon = \varepsilon_{in}$ in the inlet channels into the initial parameters, assume the sliding condition with the combustion chamber and take the gas to be equal to zero ($u=0$).

We conduct a numerical experiment to verify the alternative processing and forward operation of the combustion chamber based on biomass pyrolysis and analyze the aerodynamic behavior of the chamber only for air capacity. In the numerical process, we assume the air flow in the inlet channels to be 1 m/s. The numerical modeling process determined the air velocity module and the relative pressure distribution in the combustion chamber and is presented in Figure 2.

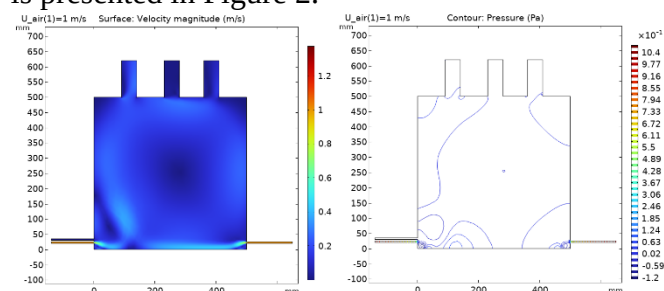


Fig.2. Aerodynamic behavior in the combustion chamber when the inlet air flow velocity is 1 m/s.

Figure 2 shows the velocity and pressure distribution of the air flow along the combustion chamber. We can see that the largest values of the air flow were observed in the inlet channels and in their adjacent parts with the combustion chamber. As the air flow entered the combustion chamber, its velocity decreased and was distributed throughout the combustion chamber. In most of the main volume of the combustion chamber, the flow velocity moved in the range of 0.1-0.5 m/s.

Relatively high velocity zones were observed in the lower part of the chamber, especially near the inlet channels. The velocity values of the high combustion products in the outlet channels were different, which affected the uneven distribution of the air flow along the three channels. Figure 2 also shows the distribution of relative pressure inside the combustion chamber, and we can see that the relative pressure varied in the range of 0.12-1.04 Pa. The pressure values in the internal volume of the combustion chamber were relatively evenly distributed.

The preliminary results presented in Figures 1 and 2 show that the velocity and pressure fields of the air flow in the combustion chamber can be numerically determined based on the adopted geometric model, computational grid, initial and boundary conditions. To assess the numerical reliability of the model, the convergence of the solution, the balance of mass flows at the inlet and outlet, and the independence of the results from the computational grid density were additionally checked.

When liquid pyrolysis fuel obtained from biomass pyrolysis is sprayed into the combustion chamber in separate channels with air, the air flow velocity, fuel droplet motion trajectories, and relative pressure distribution in the combustion chamber were numerically modeled using the COMSOL Multiphysics software package, and the results are presented in Figures 3 and 4.

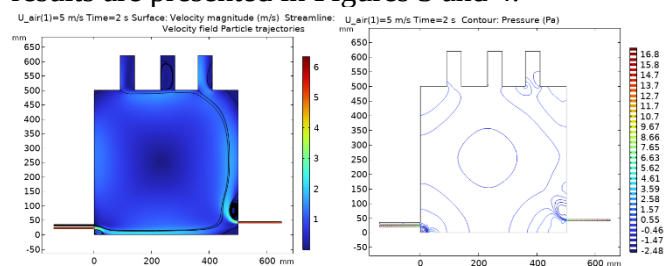


Fig.3. Aero-hydrodynamic motion in the combustion chamber when the inlet air flow and pyrolysis fluid velocity are 5 m/s.

Figures 3-4 show the air flow and pyrolysis fluid velocity modulus, flow lines, and relative pressure distribution inside the combustion chamber. The results of numerical modeling using the COMSOL Multiphysics software package show that a circulation flow is formed that completely

occupies the working volume of the combustion chamber. The formation of a closed contour of the flow lines leads to the recirculation of the air supplied from both sides of the combustion chamber inside the chamber and an increase in its hydrodynamic residence time. However, this state of air circulation creates favorable aerodynamic conditions for increasing the duration of mixing of pyrolysis fluid droplets obtained from biomass pyrolysis with the air flow, improving the distribution of pyrolysis fluid droplets throughout the entire volume of the combustion chamber, and accelerating the subsequent evaporation and combustion processes.

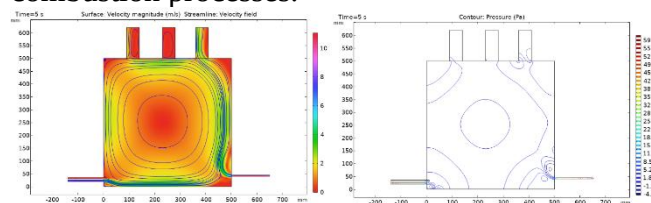


Fig.4. Aero-hydrodynamic motion in the combustion chamber when the inlet air flow and pyrolysis fluid velocity are 10 m/s.

High flow velocity values were observed near the inlet channels, the bottom of the combustion chamber, the right-side wall, and the outlet channels. In the center of the combustion chamber, the flow velocity is relatively small, forming a circulation core, and the air flow on the right side is directed upwards along the chamber wall, the combustion chamber turns in the upper part and returns to the central area. As a result, a vortex is formed in the combustion chamber, which enhances the mixing of the pyrolysis liquid and air.

As can be seen in Figure 4, the flow intensity in the three outlet channels located at the top of the combustion chamber is different. The main part of the flow lines is directed towards the outlet channel on the right, which affects the uneven distribution of the temperature field in the combustion chamber, therefore, it is necessary to determine the optimal location of the outlet channels.

When the pyrolysis liquid is sprayed from the inlet channel located on the left side of the combustion chamber, the initial hydrodynamic motion of the droplets is determined by the spray velocity and angle. The aerodynamic drag force of the air flow affects the motion of the droplets in the

combustion chamber. As a result, small-diameter liquid droplets adapt to the air flow faster and spread throughout the entire volume of the combustion chamber along the circulating flow. Large droplets, on the other hand, retain their initial direction longer due to their large inertia and are more likely to hit the combustion chamber wall. Therefore, the effective dispersion of droplets when the pyrolysis liquid is transferred to the combustion chamber depends not only on the flow area, but also on the droplet diameter, spray velocity, spray angle, pyrolysis liquid density, temperature and viscosity.

Conclusions. The results obtained in the research work show that a stable circulation motion

is formed in the combustion chamber, which increases the residence time and mixing intensity of the pyrolysis liquid and air mixture obtained from biomass pyrolysis. However, the shift of the flow in the combustion chamber to the right and its uneven distribution along the outlet channels indicate the need for additional optimization of the combustion chamber design and inlet flow parameters. The optimal mode should be selected based on the fact that liquid droplets and air flow occupy the entire volume of the combustion chamber, reducing the proportion of droplets hitting the side walls, equalizing the mass flow in the outlet channels, and limiting pressure loss.

REFERENCES

- [1] Узаков, Г. Н., Давланов, Х. А., & Тошмаматов, Б. М. (2021). Энергоэффективные системы и технологии с использованием альтернативных источников энергии. *Muqobil energetika*, 1, 7-20.
- [2] Toshmamatov, B. M., Uzboev, M. D., & Mamatova, M. (2025). Analysis of thermal and technical parameters of alternative fuels obtained from biomass pyrolysis. *American Journal of Applied Science and Technology*, 5(12), 161-166.
- [3] Kuznetsov, G. V., Malyshev, D. Yu., Kostoreva, Zh. A., Syrodoy, S. V., & Gutareva, N. Yu. (2020). The ignition of bio-water-coal fuel particles based on coals of different degrees of metamorphism. *Energy*, 201, Article 117701.
- [4] Polyakovs, A., et al. (2020). Preparation of coal-water slurry using a high-speed mixer-disperser. *Environment and Environmental Effects*, 8, 77-81.
- [5] Toshmamatov, B. M., Uzboev, M. D., & Toshboev, A. R. (2025). FTIR analysis of coal-water alternative fuel. *Muqobil energetika*, 4(21), 45-48.
- [6] Toshmamatov, B. M., Uzboev, M. D., & Mamatova, M. (2025). Development of a method for obtaining energy-efficient water-coal fuel based on biomass pyrolysis products. *Muqobil energetika*, 4(21), 38-44.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Davlonov, K. A., Uzboev, M. D., & Toshmamatov, B. M. (2026). CFD modeling of the aerohydrodynamic behavior of biomass pyrolysis liquid and airflow in a combustion chamber. *Digital Technologies in Industry*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.11>

УДК: 669.2/.8

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.7

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КОБАЛЬТОСОДЕРЖАЩИХ КЕКОВ



**Эшонкулов Учкун
Худойназар угли**

Доктор философии (PhD) по
техническим наукам, заведующий
кафедрой геологии и горного
дела, Каршинский
государственный технический
университет, Карши,
Узбекистан
E-mail:
uchqun.eshonqulov19@mail.ru
ORCID ID: 0009-0002-8415-7218
Science ID: FQD-0225-0022



**Хасанов Абдирашид
Салиевич**

Доктор технических наук,
профессор, заместитель
директора по технологиям
Центра развития и внедрения
инновационных технологий АО
«Алмалыкский горно-
металлургический комбинат»,
Алмалык, Узбекистан
E-mail: a.xasanov@srt-journal.uz
ORCID ID: 0009-0004-9162-7622
Science ID: DTV-1225-0005



**Каршиев Хумоюн
Комилович**

Старший преподаватель, доктор
философии (PhD) по
техническим наукам,
Алмалыкский государственный
технический институт,
Алмалык, Узбекистан
E-mail: qarshiyev0409@gmail.com
ORCID ID: 0009-0003-6457-8266
Science ID: MSN-0525-0036

Аннотация. В статье анализируются современные гидрометаллургические методы извлечения кобальта из промежуточных продуктов цинкового производства. Особое внимание уделяется кекам с содержанием кобальта 0,5-3,0% и цинка 40-60%. Рассмотрено образование этих промежуточных продуктов, их экологическая опасность и возможность извлечения кобальта, кадмия и цинка из их состава путем переработки в металлургической промышленности. Сравнивали селективное кислотное выщелачивание, окислительное осаждение и аммиачно-сульфатную аммиачную обработку. Анализ результатов ранее проведенных исследований показывает, что регулирование pH и окислительно-восстановительного потенциала позволяет растворять более 90% цинка, сохраняя при этом основную часть кобальта в твердом остатке. При окислении Co^{2+} до Co^{3+} можно получить продукт, содержащий более 50% кобальта, и раствор с концентрацией остаточного металла менее 1 мг/л. Озон при pH 4,0 обеспечивает осаждение более 98% кобальта, но требует больших эксплуатационных затрат. Сделан вывод, что при выборе технологии необходимо учитывать селективность отделения металлов, расход реагентов, возможность возврата растворов в производство и экологические последствия переработки кеков.

Ключевые слова: Кобальт-никелевый кек, гидрометаллургия, техногенное сырье, кислотное селективное выщелачивание, селективное выщелачивание, окислительное осаждение, аммиачное селективное выщелачивание, цементация, электролит, диаграмма Eh-pH, озон, окислители, персульфат натрия, аминокомплексы, извлечение металлов, разделение компонентов, производство цинка.

Received: 25.07.2026

Accepted: 03.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

KOBALT TARKIBLI KEKLARNI GIDROMETALLURGIK QAYTA ISHLASHNING ZAMONAVIY TEXNOLOGIYALARI

Eshonqulov Uchqun
Xudonazar o'g'li

PhD, Qarshi davlat texnika
universiteti, Geologiya va konchilik
ishi kafedrası mudiri, Qarshi,
O'zbekiston

Xasanov Abdirashid
Saliyevich

Texnika fanlari doktori, professor,
"Olmaliq kon-metallurgiya
kombinati" AJ Innovatsion
texnologiyalarni rivojlantirish va
joriy etish markazi texnologiya
bo'yicha direktor o'rinbosari,
Olmaliq, O'zbekiston

Qarshiyev Humoyun
Komilovich

Katta o'qituvchi, t.f.f.d. (PhD),
Olmaliq davlat texnika instituti,
Olmaliq, O'zbekiston

Annotatsiya. Maqolada rux ishlab chiqarishning oraliq mahsulotlaridan kobaltni ajratib olishning zamonaviy gidrometallurgik usullari tahlil qilingan. Tarkibida 0,5–3,0% kobalt va 40–60% rux bo'lgan keklarga alohida e'tibor qaratilgan. Unda ushbu oraliq mahsulotlarning hosil bo'lishi, ekologik xavfi hamda metallurgiya sanoatida qayta ishlash orqali tarkibidan kobalt, kadmiy va ruxni ajratib olish imkoniyatlari ko'rib chiqilgan. Selektiv kislotali eritmaga o'tkazish, oksidlovchi cho'ktirish va ammiakli-sulfatli ishlov berish usullari taqqoslangan. Avvalgi tadqiqotlar natijalarining tahlili shuni ko'rsatadiki, pH va oksidlanish-qaytarilish potensialini tartibga solish orqali kobaltning asosiy qismini qattiq qoldiqda saqlagan holda, ruxning 90 foizdan ortig'ini eritish mumkin. Co^{2+} ionini Co^{3+} gacha oksidlash orqali tarkibida 50 foizdan ortiq kobalt bo'lgan mahsulot va qoldiq metall konsentratsiyasi 1 mg/l dan kam bo'lgan eritma olish mumkin. Ozon pH 4,0 da kobaltning 98 foizdan ko'prog'ini cho'ktirishni ta'minlasa-da, ushbu jarayonga katta ekspluatatsion xarajatlarni talab etiladi. Xulosa qilib aytganda, texnologiyani tanlashda metallarni ajratishning selektivligini, reagentlar sarfini, eritmalarini ishlab chiqarishga qaytarish imkoniyatini va keklarni qayta ishlashning ekologik oqibatlarini hisobga olish zarur.

Kalit so'zlar: Kobalt-nikel kek, gidrometallurgiya, texnogen xomashyo, kislotali selektiv tanlab eritish, selektiv tanlab eritish, oksidlovchi cho'ktirish, ammiakli selektiv tanlab eritish, sementatsiya, elektrolit, Eh-pH diagrammasi, ozon, oksidlovchilar, natriy persulfat, aminokomplekslar, metallarni ajratib olish, komponentlarni ajratish, rux ishlab chiqarish.

MODERN HYDROMETALLURGICAL TECHNOLOGIES FOR THE PROCESSING OF COBALT-CONTAINING CAKES

Eshonkulov Uchkun
Khudonazar ugli

Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Head of the
Department of Geology and Mining,
Qarshi State Technical University,
Qarshi, Uzbekistan

Khasanov Abdurashid
Solievich

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Deputy Director for
Technology, Center for the
Development and Implementation of
Innovative Technologies, JSC
"Almalyk Mining and Metallurgical
Combine", Almalyk, Uzbekistan

Karshiev Khumoyun
Komilovich

Senior Lecturer, Doctor of
Philosophy (PhD) in Technical
Sciences, Almalyk State Technical
Institute, Almalyk, Uzbekistan

Abstract. The article analyzes modern hydrometallurgical methods for extracting cobalt from intermediate products of zinc production. Particular attention is paid to filter cakes with a cobalt content of 0.5–3.0% and a zinc content of 40–60%. The formation of these intermediate products, their environmental hazards, and the possibility of extracting cobalt, cadmium, and zinc from them through processing in the metallurgical industry are considered. Selective acid leaching, oxidative precipitation, and ammonia-sulfate leaching were compared. An analysis of previous research shows that controlling the pH and redox potential allows for the dissolution of over 90% of the zinc while retaining most of the cobalt in the solid residue. By oxidizing Co^{2+} to Co^{3+} , it is possible to obtain a product containing over 50% cobalt and a solution with a residual metal concentration below 1 mg/L. Ozone at a pH of 4.0 ensures the precipitation of over 98% of the cobalt but incurs high operational costs. It is concluded that when selecting a technology, one must consider the selectivity of metal separation, reagent consumption, the feasibility of recycling solutions back into the production cycle, and the environmental consequences

of processing the filter cakes.

Keywords: Cobalt-nickel cake, hydrometallurgy, technogenic raw materials, acid selective leaching, selective leaching, oxidative precipitation, ammonium selective leaching, cementation, electrolyte, Eh-pH diagram, ozone, oxidizers, sodium persulfate, amino complexes, metal extraction, component separation, zinc production.

Введение. Рост производства аккумуляторных батарей, огнеупорных сплавов и катализаторных материалов приводит к увеличению спроса на кобальт. В то же время это объясняется качеством первичного сырья для выплавки металла, сложностью переработки комплексных руд и различным распределением природных ресурсов. Поэтому наряду с традиционными месторождениями практический интерес представляют техногенное сырье и отходы, образующиеся в металлургической промышленности, а также промежуточные продукты, содержащие кобальт в концентрации, достаточной для промышленного извлечения.

Большая часть кобальта получается гидрометаллургическими методами, обеспечивающими переход металлов в раствор с последующим их селективным разделением. Перспективными источниками вторичного сырья являются кеки, образующиеся при очистке растворов цинка перед электролизом. Они содержат не только кобальт и цинк, но и кадмий, никель, медь и свинец. Накопление такого техногенного сырья не только приводит к потере ценных компонентов, но и оказывает долгосрочное негативное воздействие на окружающую среду.

Технологическая ценность кеков определяется относительно высоким содержанием в них металлов: концентрация кобальта в их составе достигает 0,5-3,0%, а цинка - 40-60%. Поэтому их следует рассматривать не только как отходы цинкового производства, но и как многокомпонентное техногенное сырье. Выбор рационального способа переработки требует учета химических форм металлов, кислотности среды, окислительно-восстановительного потенциала и поведения сопутствующих металлов. Наряду с этим, актуальной задачей является сравнительная оценка существующих гидрометаллургических методов извлечения и концентрирования кобальта с

возможностью возврата цинксодержащих растворов в основное производство.

Промежуточные продукты гидрометаллургии цинка являются перспективным источником кобальта. При обжиге цинковых концентратов и их последующей выщелачивании серной кислотой, кобальт вместе с цинком, медью, кадмием и никелем переходит в раствор. Для подготовки раствора к электролизу примеси из него удаляют путем цементации цинковым порошком, в результате чего образуется кобальтсодержащий кек. Содержание кобальта в таких кеках достигает 0,5-3,0%, а цинка - 40-60%, что позволяет использовать их в качестве ценного техногенного сырья.

Обзор литературы. В настоящее время примерно 70% мирового кобальта производится с использованием гидрометаллургических методов, включающих восстановительный обжиг - выщелачивание аммиачными растворами или процессы кислотного выщелачивания под высоким давлением. Полученные растворы после очистки используются для получения кобальта путем электроосаждения [1, 2, 3].

Однако при постоянно растущем спросе на кобальт первичные ресурсы год за годом уменьшаются. Таким образом, максимальная извлечения кобальта из вторичных ресурсов вызывает серьезную вниманию.

В настоящее время вторичные ресурсы, которые могут быть использованы для извлечения кобальта в основном включают хвосты флотации кобальтового минерала, металлургические отходы и побочные продукты в процессе выплавки меди, никеля и цинка, а также отработанные катализаторы и батареи.

Содержание кобальта в металлургических отходах и промпродуктах выше, чем у первичных руд. Таким образом, явно экономично и целесообразно извлекать кобальт из вторичных металлургических отходов, что может снизить зависимость от первичного минерала кобальта [4, 5].

Как было сказано выше, кобальт всегда ассоциируется с медью, цинком, никелем и др. Однако содержание кобальта в цинковых концентратах в целом низкое (примерно 0,001–0,005%) [6].

При гидрометаллургической переработке цинковых концентратов, кобальт содержащийся в них, после окислительного обжига при сернокислотном выщелачивании переходит в раствор совместно с цинком. [7]. Однако этот раствор не подходит для электролиза цинка, так как он обычно содержит некоторые примеси как медь, кадмий, никель и кобальт. Примеси как железо, никель и кобальт при электроосаждении цинка, приводят к избыточному расходу электроэнергии за счет осаждения на поверхности цинка и повторного растворения в кислом электролите. особенно железа, никеля и кобальта, может приводит к расходу энергии за счет осаждения на поверхность цинка и повторного растворения в кислом электролите. Таким образом, для удаление этих примесей используется процесс очистки. Порошки цинка обычно используются для удаления примесей способом цементации. В кислых водных растворах сульфата цинка медь и кадмий цементируются быстро, в то время как цементация кобальта затруднена и медленна, так как его осаждение затруднено [8, 9]. Однако при введении цинкового порошка в качестве активаторов меди и мышьяка или сурьмы цементация кобальта может быть успешно завершена.

В условиях сокращения доступных запасов природного кобальтового сырья всё большее значение приобретает переработка металлургических промпродуктов. Особый интерес представляют кеки, в которых накапливаются кобальт и другие цветные металлы. Благодаря содержанию ценных компонентов такие материалы рассматриваются не только как отходы производства, но и как перспективный техногенный источник металлургического сырья [10, 11]

Разнообразные цинковые концентраты и процессы очистки, используемые в гидрометаллургии цинка, приводят к разнообразию минералогического и химического составов и элементов, присутствующих в кеках.

Способы извлечение цинка и кобальта из кеков в основном включают окислительное осаждение, селективное кислотное выщелачивание, аммиачно–сульфатное выщелачивание и т.д.

Процесс селективного кислотного выщелачивания. Известно, что в соответствии с механизмом очистки цинкового электролита от кобальта цинк, кобальт и сопутствующие элементы в составе кеков находятся преимущественно в виде самостоятельных минеральных фаз и химических соединений.

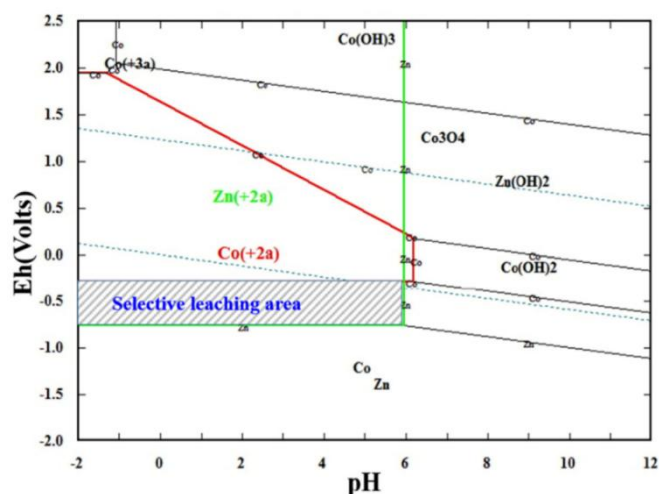


Рис.1. Диаграмма Eh-pH системы Zn-Co-H₂O при 25 °C.

Кислотное выщелачивание кеков является одним из наиболее эффективных методов гидрометаллургической переработки, обеспечивающим перевод кобальта, цинка и других ценных компонентов из труднорастворимых соединений и фаз твёрдого материала в растворимую форму, а термодинамические данные, иллюстрирующие области стабильности частиц, представлены на рис. 1, концентрация Zn^{2+} и Co^{2+} были выбраны как 1 моль/л и 0,01 моль/л.

Диаграмма Eh – pH системы Zn–Co–H₂O при 25 °C указывает на то, что электродный потенциал Zn^{2+}/Zn более отрицателен, чем электродный потенциал Co^{2+}/Co (–0,763 и –0,277, соответственно). Из диаграммы видно, что Zn^{2+} и Co^{2+} могут присутствовать в растворе без образования гидроксидов при pH менее 5,85. Поэтому, контролируя потенциал раствора и pH в определенном диапазоне, так как зона

селективного выщелачивания, показанная на рис. 3, цинк из кека может быть переведен в раствор, в то время как кобальт остаётся в осадке от выщелачивания остаток от выщелачивания. Этот метод разделения цинка и кобальта определяется как селективное кислотное выщелачивание, и его механизм выщелачивания можно объяснить гальванической реакцией $Zn - Co$, как показано на рис. 2.

Поскольку восстановительный потенциал цинка ниже, чем у кобальта, гальванический элемент с цинком в качестве отрицательного электрода и кобальтом в качестве положительного электрода может образовываться при помещении кека в кислоту определенной концентрации. Реакция окисления на отрицательном электроде приводит к превращению Zn в Zn^{2+} с высвобождением электронов.

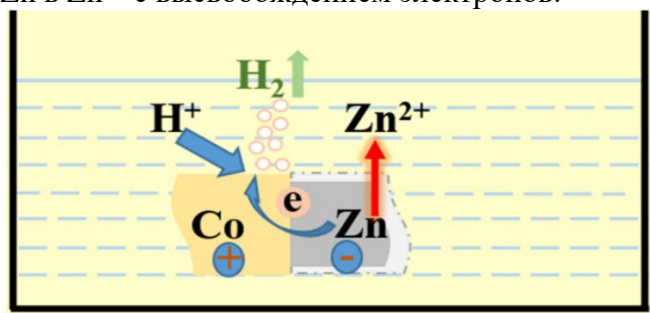


Рис.2. Механизм селективного выщелачивания.

В результате протекания электрохимической реакции происходит растворение цинка, содержащегося в кеке, при этом кобальт, обладающий более электроположительным потенциалом, концентрируется в остатке выщелачивания.

На основе механизма селективного выщелачивания, ученые [12] изучали извлечение кобальта из кобальтсодержащего кека содержащий от 0,6 до 1,0% кобальта после очистки. В растворе серной кислоты 150 г/л, присутствующие металлы выщелачивались из кека при строгом контроле pH реакционной пульпы, и в конечном итоге был получен остаток от выщелачивания с концентрацией кобальта от 6 до 12%. В дополнение выщелачивающий раствор, богатый сульфатом цинка, можно было бы вернуть в гидрометаллургический процесс получения цинка.

Горячий кек цинкового завода после фильтрации использовался [13] для селективного выщелачивания цинка, а эффективность выщелачивания Zn было выше 95% при низком растворении других металлических элементов при оптимальных условиях выщелачивания (температура 60 °C, время 120 мин, pH 5, соотношение твердой и жидкой фаз (Т:Ж) 6:1 и скорость перемешивания 625 об/мин).

В работе [14] рассмотрено, что в результате селективного выщелачивания кека был получен раствор, содержащий 141 г/л Zn , 53 г/л Cd , 0,01 г/л Co и 0,003 г/л Ni . По сути, контролируя потенциал кислотного раствора и pH, селективное выщелачивание может приводить к тому, что более 90% цинка в кеке растворяется в растворе в форме сульфата цинка, в то время как более 90% кобальта остается в остатке после выщелачивания [15, 16].

Следовательно, селективное выщелачивание является эффективным методом извлечения цинка, а содержание кобальта в кеке после выщелачивания увеличивается в 10 раз, что является благоприятным показателем к дальнейшему извлечению кобальта. Однако при кислотном выщелачивании примеси, такие как кадмий и цинк, растворяются в растворе одновременно с цинком, что указывает на то, что требуется ряд строгих процессов очистки и требуется отделить эти элементы друг от друга для их дальнейшей переработки.

Процесс окисления-осаждения. Кобальт имеет два валентных состояния (Co^{2+} и Co^{3+}), и их физические и химические свойства в растворе заметно отличаются. Когда Co^{2+} окисляется до трехвалентного, его устойчивая область существования в растворе резко уменьшается, как показано на рис. 3.

Реакция гидролиза Co^{3+} и образование $Co(OH)_3$ будет происходить и при повышенной кислотности. На рис. 3. показано, что значения pH, необходимые для реакция гидролиза Co^{3+} и Zn^{2+} составляет -1,08 и 5,95 при 25 °C, соответственно, что приводит к наличию отдельной сосуществующей области $Co(OH)_3$ и Zn^{2+} при pH раствора от -1,08 до 5,95. Кроме того, концентрация кобальта в растворе может быть снижена до минимального уровня при

окислении–осаждении, поскольку растворимость $\text{Co}(\text{OH})_3$ значительно мала ($K_{sp} = 2 \times 10^{-44}$). Таким образом, процесс окисление–осаждение является высокоэффективным методом разделения кобальта и цинка в растворе путем окисления двухвалентных ионов кобальта в трехвалентные. Широко используемыми окислителями являются H_2O_2 [17,18], NaClO , NaClO_3 , KMnO_4 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ и др.

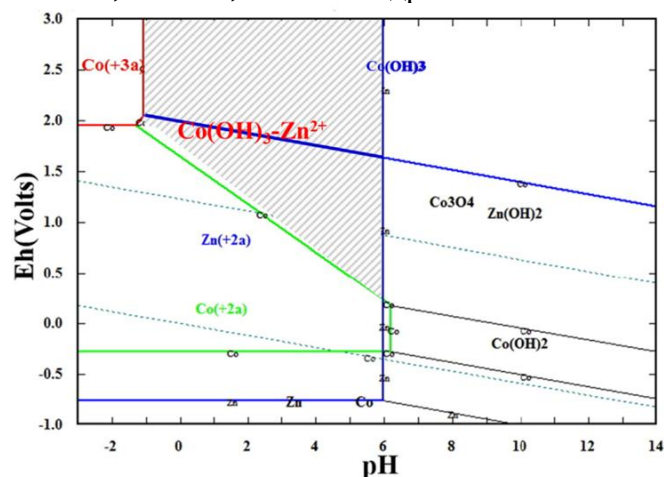
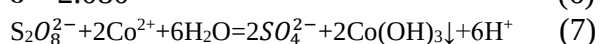
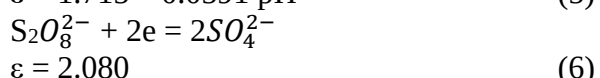
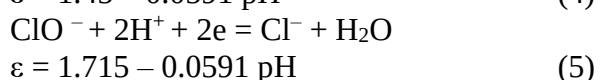
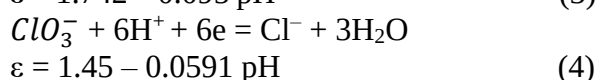
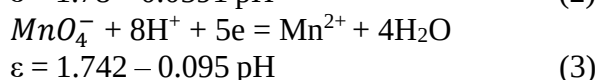
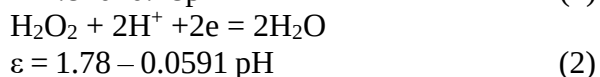
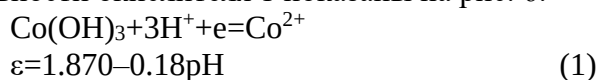


Рис.3. Доминирующая область окисленно – осажженного кобальта на диаграмме Eh–pH системы Zn–Co–H₂O при 25 °C (концентрации Zn^{2+} и Co^{2+} выбраны как 1 и 0,01 моль/л).

Для сравнения их окислительной способности Хонг и Го [19, 20] рассчитали и проанализировали зависимость между окислительным потенциалом окислителя и pH, и результаты расчета уравнений (1.1)–(1.6) при активности окислителя 1 показаны на рис. 6.



Результаты показали, что окислительные потенциалы этих окислителей уменьшаются с

увеличением pH раствора, за исключением $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$. Рассмотрен процесс окисления–осаждения кека. Во многих исследованиях эксперименты были проведены с использованием $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ в качестве окислителя [21, 22, 23]. Технологическая схема показана на рис. 5, а реакция механизм выражается как уравнение (1.5).

При окислении и гидролизе ионов кобальта, концентрация H^+ увеличится, а pH раствора уменьшается, что не способствует гидролизу и осаждению ионов кобальта. Следовательно, необходимо регулирование pH раствора для обеспечения эффективности отделения кобальта, и для этого обычно используется раствор гидроксида натрия. Таким образом, при переработке кека, цинк переходит в раствор, кобальт осаждается (содержание кобальта выше 50%). Цинкосодержащий раствор с содержанием кобальта менее 1 мг/л можно использовать в электролизе цинка. Кроме того, окисление и осаждение кобальта с использованием персульфата аммония изучал Гюлер и Сейранкая [24], они исследовали влияние pH раствора, температуры и концентрации окислителя.

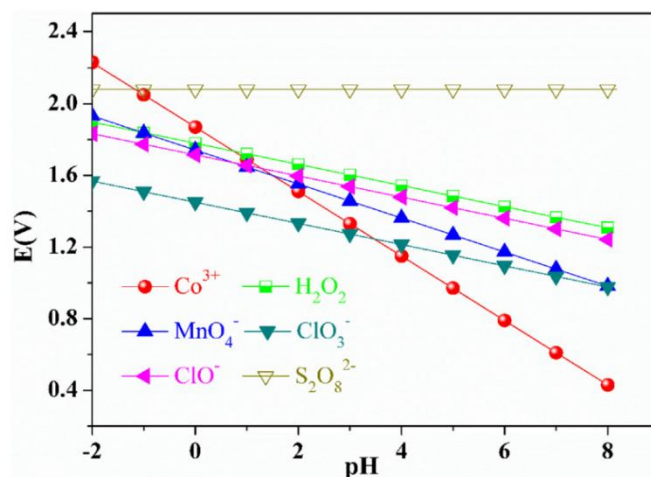


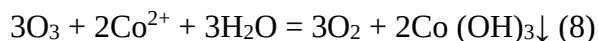
Рис.4. Связь между электродным потенциалом и pH оксидантов в стандартном состоянии.

Результаты показали, что степень извлечения кобальта колеблется от 70 до 90% в зависимости от концентрации окислителя, а ионы кобальта осаждаются в виде CoOOH (В присутствии щелочи суспензии $\text{Co}(\text{OH})_2$

окисляются воздухом до коричневого $\text{CoO}(\text{OH})$, причем это окисление быстро осуществляется окислителями, такими как гипохлорит, бромная вода или перекись водорода [25]. Кроме того, эффективность осаждения кобальта была связано с его концентрацией: при более высокой концентрации наблюдается лучший эффект осаждения.

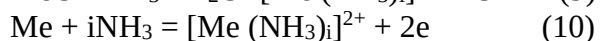
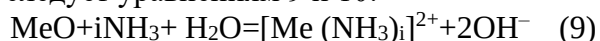
Озон считается чистым окислителем, поскольку он превращается в кислород или оксиды после реакции [26]. Об окислительном осаждении кобальта с использованием озона сообщалось во многих исследованиях [27] и его механизм может быть выражен как уравнение (8). Более 98% кобальта в растворе можно окислить и осадить контролируемым методом, а оптимальный pH раствора для извлечения кобальта выбран равным 4,0. Изучение кинетики реакции окисления–осаждения кобальта (II) показало, что реакция осаждения соответствует модели, контролируемой диффузией. Таким образом, кобальт можно эффективно отделить от цинка без вторичного загрязнения с помощью окислителя озона.

Однако высокая стоимость производства озона ограничивает его применение. Другие окислители, такие как KMnO_4 и NaClO , используются для разделения цинка и кобальта методом окисление–осаждение, позволяло добиться и высокого извлечения кобальта в остаток выщелачивания. Однако, как показано в уравнениях (1.3)-(1.6), Mn^{2+} и Cl^- будут растворяться в растворе, что приводит к вторичному загрязнению выщелачивающего раствора, направляемого на электроосаждение цинка.



Процесс аммиачно–сульфатно–аммиачного выщелачивания. Оксиды цинка, кобальта, меди и кадмия растворяются в аммиачно - водных растворах сульфата аммония, образуя устойчивые комплексы ионов металлов и аммиака, а их металлы также могут образовывать аммиачные комплексы в присутствии окислителей.

Уравнения реакции можно представить в виде следуют уравнениям 9 и 10:



где Me Zn, Co, Cu, Cd, а i представляет собой количество молекул аммиака в комплексе и составляет от 1 до 6.

С увеличением концентрации аммиака количество молекул аммиака в комплексе увеличивается, а стабильность комплекса улучшается.

Значения констант устойчивости амминных комплексов кобальта при комнатной температуре 25°C приведены в табл. 1. Представленные данные свидетельствуют о том, что повышение концентрации аммиака способствует образованию устойчивых амминных комплексов кобальта, что, в свою очередь, благоприятно влияет на процесс его выщелачивания.

На основе механизма кобальт-аммиачных комплексов, Чжао Тинкай и Тан Мотанг и др. изучали извлечение цинка и кобальта из кеков гидрометаллургии цинка с использованием процесса аммиачно-сульфатно-аммиачного (АСА) выщелачивания.

Таблица 1.

Константа устойчивости комплекса кобальт–аммиак при комнатной температуре.

Типы комплексов	$\text{Co}(\text{NH}_3)_2^{2+}$	$\text{Co}(\text{NH}_3)_3^{2+}$	$\text{Co}(\text{NH}_3)_4^{2+}$	$\text{Co}(\text{NH}_3)_5^{2+}$	$\text{Co}(\text{NH}_3)_6^{2+}$	
$\lg \beta_i$	2,11	3,74	4,79	5,55	5,73	5,11



Рис.5. Технологическая схема процесса окисления-осаждения с использованием $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ в качестве окислителя.

Технологическая схема процесса АСА показана на рис.6.

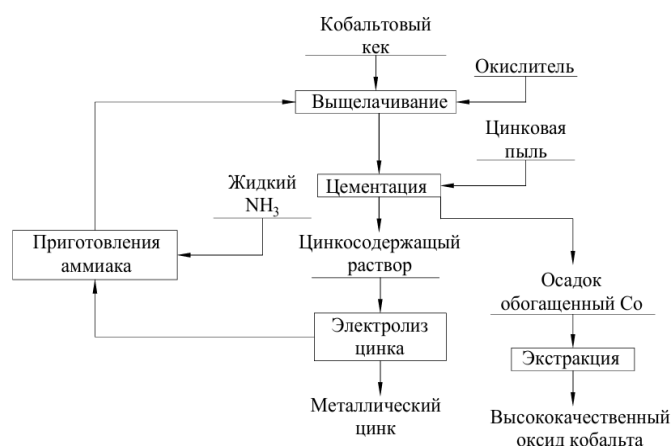


Рис. 6. Технологическая схема процесса АСА.

Объект и методика исследования.

Объектом исследования являются кобальтсодержащие кеки, образующиеся при производстве цинка. В зависимости от условий образования, в составе такого техногенного сырья содержится 0,5-3,0% Co, 40-60% Zn, а также такие металлы, как кадмий, никель, медь и свинец.

Исследование было выполнено путём анализа и сопоставления опубликованных результатов по переработке кобальтсодержащих кеков методами селективного кислотного выщелачивания, окислительного осаждения и аммиачно-сульфатной обработки. Возможность разделения цинка и кобальта оценивалась с использованием Eh–pH диаграмм системы Zn–Co–H₂O, стандартных электродных потенциалов, произведений растворимости соединений, а также констант устойчивости аммиачных комплексов. При сопоставлении технологических схем учитывались степень извлечения металлов в раствор или осадок, селективность разделения компонентов, расход реагентов, параметры процесса и качество получаемых продуктов. Также были рассмотрены возможность возврата цинка в процесс электролиза после очистки цинксодержащих растворов от примесей, вероятность образования вторичных отходов и перспективы промышленного применения изучаемых методов.

Результаты и их обсуждение. Сравнительный анализ опубликованных данных показывает, что кеки, образующиеся при очистке растворов цинка, можно рассматривать как самостоятельный источник кобальта и цинка. Если содержание кобальта в их составе

достигает 0,5-3,0%, то концентрация цинка составляет 40-60%. Такие показатели определяют целесообразность комплексного извлечения металлов и снижения объема отходов, направляемых на длительное хранение.

Кислотное выщелачивание основано на различных электрохимических свойствах цинка и кобальта. Более отрицательный потенциал пары Zn^{2+}/Zn в основном способствует растворению цинка, в то время как кобальт накапливается в твердой фазе. При температуре 60°C, продолжительности 120 мин, pH 5, соотношении Ж:Ж 6:1 и скорости перемешивания 625 об/мин извлечение цинка в раствор превышает 95%. Управление кислотностью и потенциалом пульпы позволяет растворять более 90% Zn и одновременно удерживать в остатке более 90% Co. В результате содержание кобальта в твердом продукте может увеличиться примерно в десять раз. Вместе с цинком в раствор частично переходят кадмий и другие примеси, поэтому полученный раствор нуждается в дополнительной очистке.

Другим методом разделения металлов является окислительное осаждение, при котором ион Co^{2+} переходит в ион Co^{3+} и затем образует малорастворимый $Co(OH)_3$. При использовании $Na_2S_2O_8$ образуется осадок, содержащий более 50% кобальта, а его остаточная концентрация в цинковом растворе снижается до уровня ниже 1 мг/л. В зависимости от количества вводимого окислителя степень осаждения кобальта составляет 70-90%.

Применение озона позволяет осаждать более 98% кобальта при pH 4,0. Преимуществом озонирования является отсутствие солевых продуктов, которые могут загрязнять раствор. Однако высокие затраты, связанные с получением озона, ограничивают промышленное применение этого метода. Перманганат калия и гипохлорит натрия также обеспечивают высокую степень осаждения кобальта, однако их применение приводит к накоплению в растворе ионов Mn^{2+} и Cl^- , нежелательных для дальнейшего электролиза цинка.

При аммиачно-сульфатно-аммиачном выщелачивании выделение Zn, Co, Cu и Cd происходит за счет образования растворимых аминоккомплексов. Увеличение концентрации

аммиака способствует образованию более устойчивых комплексных соединений и увеличивает перенос металлов в раствор. Однако эффективность процесса зависит не только от концентрации аммиака, но и от состава исходного кека, наличия окислителей и соотношения компонентов раствора выщелачивания.

Сравнение рассмотренных методов показывает целесообразность применения комбинированной технологии. На первой стадии основная часть цинка из кека может быть переведена в раствор путем выщелачивания, после чего кобальт накапливается в кеке. Очищенный раствор сульфата цинка можно вернуть в основной производственный цикл. Такая организация процесса повышает комплексность использования сырья, снижает расход первичных ресурсов и создает условия

для последующего извлечения кадмия, никеля, меди и других сопутствующих компонентов.

Закключение. Кобальтсодержащие кеки, образующиеся при производстве цинка, являются перспективным многокомпонентным техногенным сырьём. При селективном кислотном выщелачивании в раствор извлекается свыше 90% цинка, тогда как основная доля кобальта концентрируется в твёрдом остатке. Использование окислительного осаждения позволяет выделить более 98 % Со. Комбинирование этих методов обеспечивает получение обогащённого кобальтового продукта, возврат очищенных цинксодержащих растворов в производственный цикл и снижение экологического воздействия цинкового предприятия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Li, G. H., Rao, M. J., Li, Q. A., Peng, Z. W., & Jiang, T. (2010). Extraction of cobalt from laterite ores by citric acid in presence of ammonium bifluoride. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20(8), 1517–1520.
- [2] Sunnatov, J. B., Qarshiyev, H. K., & Shaymanov, I. I. (2022). Kobalt saqlagan keklarni gidrometallurgik qayta ishlash usullarini o'rganish va tahlil qilish. Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences, 2(5), 166–173.
- [3] Qarshiyev, H. K., Xasanov, A. S., Murashkeyevich, S. M., & Abdiyeva, M. M. (2024). Kobalt-nikel kekini tanlab eritishning maqbul parametrlarini tadqiq qilish. Sanoatda raqamli texnologiyalar / Цифровые технологии в промышленности, 2(4), 20–24. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.2.4.2024.059>
- [4] Sunnatov, J. B., Qarshiyev, H. K., Munosibov, S. M., Xaydaraliyev, X. R., & Yakubov, M. M. Kobalt-nikelli keklarni qayta ishlashning zamonaviy texnologiyalarini tadqiq qilish. Kompozitsion materiallar. (Manba ma'lumotlari to'liq emas.)
- [5] Qarshiyev, H. K., & Shaymanov, I. I. (2021). Rux ishlab chiqarish zavodida hosil bo'layotgan oraliq mahsulotlardan kobaltni ajratib olish imkoniyatlarini o'rganish. Science and Education, 2(3), 142–146.
- [6] Li, Q., Zhang, B., Min, X. B., & Shen, W. Q. (2013). Acid leaching kinetics of zinc plant purification residue. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 23(9), 2786–2791.
- [7] Behnajady, B., & Moghaddam, J. (2015). Statistical evaluation and optimization of zinc electrolyte hot purification process by Taguchi method. Journal of Central South University, 22(6), 2066–2072.
- [8] Boyanov, B. S., Konareva, V. V., & Kolev, N. K. (2004). Purification of zinc sulfate solutions from cobalt and nickel through activated cementation. Hydrometallurgy, 73(1), 163–168.
- [9] Nelson, A., Demopoulos, G. P., & Houlachi, G. (2000). The effect of solution constituents and novel activators on cobalt cementation. Canadian Metallurgical Quarterly, 39(2), 175–186.
- [10] Yakubov, M. M., Sunnatov, J. B., Qarshiyev, H. K., & Shaymanov, I. I. (2022). Kobalt saqlagan keklarni qayta ishlashning zamonaviy ahvoli va usullari. Science and Education, 3(5), 474–481.

- [11] Каршиев, Х. К., Мурашкевич, С. М., & Ахмедова, Н. Э. (2025). Современное состояние производства кобальта и исследование методов извлечения кобальта из металлургических отходов. *Universum: технические науки*, 2(5), 62–70.
- [12] Stanojević, D., Nikolić, B., & Todorović, M. (2000). Evaluation of cobalt from cobaltic waste products from the production of electrolytic zinc and cadmium. *Hydrometallurgy*, 54(2), 151–160.
- [13] Behnajady, B., & Moghaddam, J. (2017). Selective leaching of zinc from hazardous arsenic-bearing zinc plant purification filter cake. *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 564–574.
- [14] Gouvea, L. R., & Morais, C. A. (2007). Recovery of zinc and cadmium from industrial waste by leaching/cementation. *Minerals Engineering*, 20(9), 956–958.
- [15] Wang, Y., & Zhou, C. (2002). Hydrometallurgical process for recovery of cobalt from zinc plant residue. *Hydrometallurgy*, 63(3), 225–234.
- [16] Ashtari, P., & Pourghahramani, P. (2018). Hydrometallurgical recycling of cobalt from zinc plants residue. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(1), 155–166.
- [17] Karshiev, K., Ergashev, M., Mirzanova, Z., & Karshiboyev, S. (2025). Current state of oxidative precipitation of cobalt and study of factors affecting the oxidative precipitation process. *Universum: технические науки*, 4(7(136)), 5–10.
<https://doi.org/10.32743/UniTech.2025.136.7.20554>
- [18] Hong, T. (2003). Study on the separation of zinc and cobalt from cobalt slag by oxidation precipitation. *Xi'an University of Architecture and Technology*, 227–234.
- [19] Guo, Y. H. (2000). Discussion of the redox reaction mechanism of inorganic oxygen-containing acid. *Journal of Higher Correspondence Education (Natural Science)*, (2), 42–44.
- [20] Liu, C. X., Wang, J. K., Xie, G., & Yang, D. J. (2007). Upgrading of cobalt from cobalt–nickel slag by sodium persulfate oxidation. *Hydrometallurgy of China*, (3), 154–162.
- [21] Liu, Q. J. (2013). Enriched of cobalt from zinc plant purification residue by sodium persulfate oxidation. *Nonferrous Metallurgy of China*, 42(2), 58–60.
- [22] Zhang, Y. F. (2012). Experimental study on the oxidation of cobalt by sodium persulfate. *Xinjiang Non-Ferrous Metals*, 35(Suppl. 1), 81–82.
- [23] Güler, E., & Seyrankaya, A. (2016). Precipitation of impurity ions from zinc leach solutions with high iron contents: A special emphasis on cobalt precipitation. *Hydrometallurgy*, 164, 118–124.
- [24] Chivot, J., Mendoza, L., Mansour, C., Pauporté, T., & Cassir, M. (2008). New insight in the behaviour of Co–H₂O system at 25–150 °C, based on revised Pourbaix diagrams. *Corrosion Science*, 50, 62–69.
- [25] Liu, W., Zhang, R., Liu, Z., & Li, C. (2016). Removal of chloride from simulated zinc sulfate electrolyte by ozone oxidation. *Hydrometallurgy*, 160, 147–151.
- [26] Li, L. B., Xue, J. Q., Hong, T., Yang, J., & Wang, X. (2011). Separation of cobalt from zinc sulfate solution by novel oxidant. In H. S. Kim, J. F. Yang, C. H. Han, S. C. Thongtem, & S. W. Lee (Eds.), *Eco-Materials Processing and Design XII* (pp. 145–148). Trans Tech Publications.
- [27] Tian, Q., Xin, Y., Yao, B., & Guo, X. (2013). Efficient purification of trace cobalt in zinc hydrometallurgical process by ozone oxidation. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 23(4), 1140–1144.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Эшонкулов, У. Х., Хасанов, А. С., & Каршиев, Х. К. (2026). Современные технологии гидрометаллургической переработки кобальтосодержащих кеков. *Цифровые технологии в промышленности*, 4(3).
<https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.7>

UO‘K: 622.765.4:622.343

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.12

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

OKSIDLANGAN VA ARALASH TIPDAGI MIS RUDALARINI TO‘PLOVCHI REAGENT YORDAMIDA FLOTATSIYALASHNI O‘RGANISH



**Maxmarejabov Dilmurod
Baxtiyarovich**

*Texnika fanlari doktori, dotsent,
O‘zbekiston Respublikasi Prezidenti
Administratsiyasi huzuridagi Ta‘lim
sifatini ta‘minlash milliy agentligi
bosh inspektori, Toshkent,
O‘zbekiston
E-mail: dmahmarejabov@mail.ru
Science ID: FQD-0425-0018*



**Abdurasulova Zarina
Xusniddinovna**

*Islom Karimov nomidagi Toshkent
davlat texnika universiteti,
Toshkent, O‘zbekiston,
E-mail:
zarinaabdurasulova77@gmail.com
ORCID ID: 0009-0006-2687-9916
Science ID: MTV-0525-0043*



**Asilov Shodbay
Nurullayevich**

*“Mineral resurslar instituti” DM
kichik ilmiy xodimi, Toshkent,
O‘zbekiston,
E-mail:
shodibekasilov777@gmail.com
ORCID ID: 0009-0007-3426-4409
Science ID: MJZ-1225-0039*



**Jabborov Ergash
Yusuf o‘g‘li**

*“Mineral resurslar instituti” DM
kichik ilmiy xodimi, Toshkent,
O‘zbekiston,
E-mail:
ergashjabborov92@gmail.ru
ORCID ID: 0009-0008-0299-1529
Science ID: MSN-0525-0169*

Annotatsiya. Ushbu maqolada global mis zaxiralarining kamayishi sharoitida qiyin boyitiluvchi oksidlangan va aralash mis rudalarini (malaxit, azurit, xrizokolla) faollashtiruvchi reagentlar yordamida flotatsiyalash texnologiyasi tadqiq etilgan. Tadqiqot doirasida jahon tog‘-kon sanoatining yirik korxonalari — Kansanshi va Bozshakol kabi, yillik quvvati 1,5 dan 40 mln tonnagacha bo‘lgan fabrikalarning amaliy tajribasi hamda ularda qo‘llaniladigan natriy sulfid (Na_2S) va natriy gidrosulfid (NaHS) reagentlarining samaradorligi tizimli tahlil qilingan. Minerallar yuzasida sun‘iy sulfidli parda hosil bo‘lish mexanizmlari hamda pulpadagi sulfid ionlari konsentratsiyasini elektrokimyoviy salohiyat (Eh) orqali avtomatik boshqaruvchi CPS (Controlled Potential Sulphidisation) texnologiyasining ilmiy asoslari ko‘rsatib o‘tilgan. Kaliy va butil ksantogenatlari kabi kuchli to‘plovchilarning faollashtirilgan mineral sirti bilan o‘zaro ta‘siri hamda mineral depressiyasini bartaraf etish usullari yoritilgan.

Kalit so‘zlar: oksidlangan mis rudalari, flotatsiya, faollashtiruvchi reagentlar, natriy sulfid, CPS texnologiyasi, to‘plovchi reagentlar, misni ajratib olish.

Received: 23.07.2026

Accepted: 16.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

ИЗУЧЕНИЕ ФЛОТАЦИИ ОКИСЛЕННЫХ И СМЕШАННЫХ МЕДНЫХ РУД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОБИРАТЕЛЬНОГО РЕАГЕНТА

**Махмарежабов
Дилмурод
Бахтиярович**

*Доктор технических наук,
доцент, главный инспектор
Национального агентства по
обеспечению качества
образования при Администрации
Президента Республики
Узбекистан, Ташкент,
Узбекистан*

**Абдурасулова Зарина
Хусниiddinovna**

*Ташкентский государственный
технический университет имени
Ислама Каримова, Ташкент,
Узбекистан*

**Асилов Шодбай
Нуруллаевич**

*Младший научный сотрудник ГУ
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан*

**Жабборов Эргаш Юсуф
угли**

*Младший научный сотрудник ГУ
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан*

Аннотация. В данной статье исследована технология флотации труднообогатимых окисленных и смешанных медных руд (малахит, азурит, хризоколл) с использованием активирующих реагентов. В рамках исследования проведён системный анализ практического опыта крупных предприятий мировой горнодобывающей промышленности — Кансаниши и Бозшаколя, с годовой мощностью переработки от 1,5 до 40 млн тонн руды, а также эффективности применяемых на них реагентов — сульфида натрия (Na_2S) и гидросульфида натрия (NaHS). На основе научных принципов раскрыты механизмы формирования искусственной сульфидной плёнки на поверхности минералов и роль технологии CPS (Controlled Potential Sulphidisation), автоматически управляющей концентрацией сульфид-ионов посредством электрохимического потенциала (E_h). Описаны особенности взаимодействия сильных собирателей, таких как амиловый и бутиловый ксантогенаты, с активированной поверхностью минералов, а также методы устранения их депрессии. Предложенные технологические решения позволяют существенно повысить показатели извлечения металлов из окисленного сырья.

Ключевые слова: окисленные медные руды, флотация, активирующие реагенты, сульфид натрия, технология CPS, реагенты-собиратели, извлечение меди.

INVESTIGATION INTO THE FLOTATION OF OXIDIZED AND MIXED COPPER ORES USING A COLLECTOR REAGENT

**Maxmarejabov Dilmurod
Bakhtiyarovich**

Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor,
Chief Inspector of the National
Agency for Quality Assurance in
Education under the Administration
of the President of the Republic of
Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

**Abdurasulova Zarina
Xusniddinovna**

Tashkent State Technical University
named after Islam Karimov,
Tashkent, Uzbekistan

**Asilov Shodbay
Nurullayevich**

Junior Researcher, State Institution
“Institute of Mineral Resources”,
Tashkent, Uzbekistan

**Jabborov Ergash Yusuf
ugli**

Junior Researcher, State Institution
“Institute of Mineral Resources”,
Tashkent, Uzbekistan

Abstract. This paper investigates the flotation technology of refractory oxidized and mixed copper ores (malachite, azurite, chrysocolla) using activating reagents. The study provides a systematic analysis of the operational experience of major global mining enterprises—Kansanshi and Bozshakol—with annual processing capacities ranging from 1.5 to 40 million tons of ore, and evaluates the efficiency of sodium sulfide (Na_2S) and sodium hydrosulfide (NaHS) reagents used in these plants. The scientific mechanisms underlying the formation of an artificial sulfide film on the mineral surface are detailed, alongside the principles of CPS (Controlled Potential Sulphidisation) technology, which automatically regulates sulfide ion concentration via electrochemical potential (E_h). Furthermore, the interaction of strong collectors, such as potassium amyl xanthate (PAX) and potassium butyl xanthate (PBX), with the activated mineral surface, as well as methods to mitigate mineral depression, are highlighted. The proposed technological solutions offer a significant increase in metal recovery rates from oxidized copper resources.

Keywords: oxidized copper ores, flotation, activating reagents, sodium sulfide, CPS technology, collector reagents, copper recovery.

Kirish. Global mis sanoati sulfidli zaxiralarning kamayishi fonida oksidlangan va aralash rudalarni (malaxit, xrizokolla) boyitish uchun o‘ta yuqori gidrofillikka ega minerallarni faollashtiruvchi reagentlar yordamida sulfidlash (CPS texnologiyasi) usuliga strategik ehtiyoj sezmoqda. Hozirgi vaqtda jahon miqyosida mis

ishlab chiqarish sanoatida sulfidli rudalar mutlaq ustunlikka ega bo‘lib, umumiy ishlab chiqarishning qariyb 80 foizini tashkil etadi. Oksidlangan va aralash (sulfid-oksit) mis rudalarining ulushi esa taxminan 20 foiz atrofida baholanmoqda. Dunyo bo‘yicha yuqori sifatli va oson flotatsiyalanuvchi sulfidli mis (xalkopirit, bornit) zaxiralari tugab

bormoqda. Konlarning chuqurlashishi va uzoq vaqt davomida qayta ishlanishi natijasida ruda qatlamlari yer yuzasiga yaqin joylarda kislorod hamda yer osti suvlari bilan reaksiyaga kirishib, oksidlangan zonalarni (malaxit, azurit) hosil qilgan. Elektromobillar (EV), shamol va quyosh energetikasi hamda global infratuzilmalarning o'sishi tufayli jahon bozorida misga bo'lgan talab rekord darajaga yetdi. Global mis defitsitini qoplash uchun ilgari "chiqindi" (sub-balans) deb hisoblangan oksidlangan rudalarni sanoat aylanmasiga kiritish majburiy yechimga aylandi. Oksidlangan minerallar gidrofil (suvni oson shimuvchi) bo'lgani uchun an'anaviy flotatsiya usulida to'g'ridan to'g'ri ajralmaydi; ularni gidrometallurgiya (kislotaga bilan yuvish) orqali ajratish esa har doim ham iqtisodiy jihatdan o'zini oqlamaydi. Shu sababli, yuqorida muhokama qilingan CPS (nazorat qilinadigan sulfidlash) kabi flotatsiya texnologiyalari orqali oksidlangan rudalardan metallni samarali ajratib olish bugungi kun tog'-kon ilmining eng dolzarb va strategik yo'nalishlaridan biridir.

Oksidlangan mis rudalarini qayta ishlashda an'anaviy usullarning past samaradorligi ushbu minerallarning yuqori gidrofilligi bilan bog'liq bo'lsa [1], natriy sulfid yoki gidrosulfid yordamida sun'iy sulfidlash ajratib olishni yaxshilashning asosiy usuli hisoblanadi [2]. "Boshqariladigan potensial sulfidlash" (CPS) usuli reaktivlarning ortiqcha sarflanishining oldini olib, ko'pik faolligini oshiradi [3]. Bu jarayonda amil ksantogenati va gidroksamat kabi selektiv reagentlar kombinatsiyasidan foydalanish tavsiya etiladi [4]. Ruda tarkibidagi karbonat va silikat guruhlarining sulfid ionlari bilan almashinish mexanizmlarini to'g'ri boshqarish metallni ajratib olish darajasini oshirsa [5], mahalliy "Qalmoqir" konining murakkab rudalarini boyitishda natriy sulfid va butil ksantogenati dozalarini optimallashtirish dolzarb hisoblanadi [6].

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Tahlillar shuni ko'rsatadiki, dunyo miqyosida aralash va oksidlangan mis rudalarini qayta ishlovchi yirik boyitish fabrikalari (yiliga 1,5 dan 40 million tonnagacha ruda) flotatsiya jarayonida gidrofil minerallarni faollashtirish uchun asosan natriy sulfid (Na_2S) va natriy gidrosulfid (NaHS) reagentlaridan foydalanadi. O'ta yirik quvvatli

ishlab chiqarishlarda (masalan, Bozshakol) narxi nisbatan arzon va samarali bo'lgan Na_2S qo'llanilsa, tarkibida qiyin flotatsiyalanuvchi xrizokolla minerali ko'p bo'lgan korxonalarda (Kansanshi, Sepon) pH barqarorligini saqlash uchun NaHS reagentiga afzallik beriladi. Minerallar yuzasi muvaffaqiyatli sulfidlashgandan so'ng, ularni ko'pikka ajratib olish uchun kuchli to'plovchilar — kaliy amilksantogenati (PAX) yoki butil ksantogenati (PBX) ishlatiladi. Murakkab tarkibli tizimlarda esa ksantogenatlar selektiv gidroksamatlar yoki ditiofosfatlar bilan kombinatsiya qilinadi.

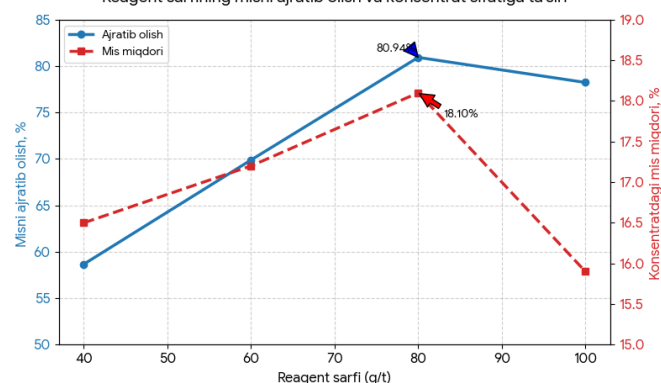
1-jadval

Jahon miqyosida oksidlangan mis minerallaridan faollashtiruvchi reagent qo'llash orqali boyitish jarayonini amalga oshiruvchi fabrikalar

Fabrika nomi	Joylashgan davlati	Yillik qayta ishlash quvvati	Asosiy oksidlangan minerallar	Qo'llaniladigan faollashtiruvchi reagent	Qo'llaniladigan to'plovchi
Kansanshi	Zambiya	25–27,5 mln tonna	Malaxit, xrizokolla, azurit	Natriy gidrosulfid (NaHS)	Kaliy amilksantogenati (PAX) + gidroksamat
Bozshakol	Qozog'iston	30 mln tonna	Malaxit, xrizokolla	Natriy sulfid (Na_2S)	Butil ksantogenati (PBX) + ditiofosfat
Sepon	Laos	2,5–3,0 mln tonna	Malaxit, azurit, psevdomalaxit	Natriy gidrosulfid (NaHS)	Kaliy amilksantogenati (PAX)
Nchanga	Zambiya	8–10 mln tonna	Malaxit, kuprit	Natriy sulfid (Na_2S)	Kaliy amilksantogenati (PAX)
Sanyuan	Xitoy	1,5–2,0 mln tonna	Malaxit, kuprit	Natriy sulfid (Na_2S) + organik aminlar	Amil va butil ksantogenatlari aralashmasi

Oksidlangan va aralash mis rudalarini flotatsiyalashda pulpadagi sulfid ionlari (S^{2-}) konsentratsiyasini elektrokimyoviy salohiyat (Eh) yordamida avtomatik boshqarishga asoslangan yuqori texnologik uslubdir.

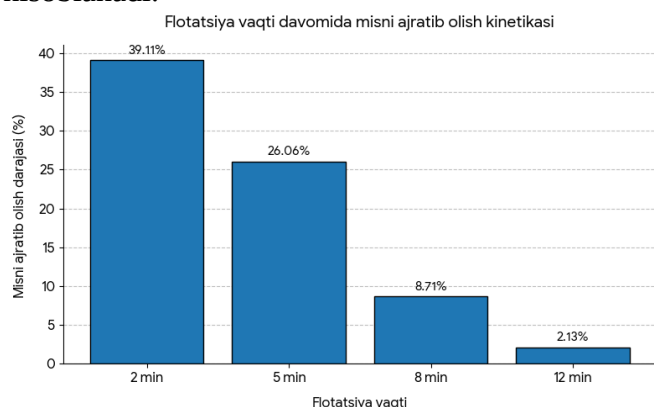
Reagent sarfining misni ajratib olish va konsentrat sifatiga ta'siri



1-rasm. Reagent sarfining misni ajratib olish va konsentrat sifatiga ta'siri.

1-rasmda to'plovchi reagent sarfining qiyin boyitiluvchi oksidlangan mis rudasini flotatsiyalash ko'rsatkichlariga ta'siri keltirilgan. Grafik tahlilidan

ko‘rinib turibdiki, reagent sarfi 40 g/t dan 80 g/t gacha oshirilganda, konsentratdagi mis miqdori 16,50 foizdan 18,10 foizgacha, metallni ajratib olish darajasi esa 58,67 foizdan 80,94 foizgacha jadal sur‘atda ko‘tariladi. Bu holat to‘plovchi reagentning mineral yuzasida gidrofob qatlamni samarali hosil qilishi bilan izohlanadi. Biroq, reagent sarfi 100 g/t gacha oshirilganda, ko‘rsatkichlarning mos ravishda 15,90 foiz va 78,24 foizgacha pasayishi kuzatiladi. Bu reagentning optimal konsentratsiyadan ortib ketishi natijasida ko‘pik barqarorligining buzilishi va selektivlikning kamayishi bilan bog‘liq. Demak, 80 g/t sarf jarayon uchun optimal texnologik rejim hisoblanadi.



2-rasm. Flotatsiya vaqti davomida misni ajratib olish kinetikasi.

2-rasmda aralash tipli mis rudasini (dastlabki rudadagi $(Cu=0,315\%)$) flotatsiyalash jarayonining vaqt bo‘yicha kinetik ko‘rsatkichlari gistogramma shaklida aks ettirilgan. Tajriba natijalariga ko‘ra, jarayonning dastlabki 2 daqiqasida eng yuqori ko‘rsatkich — 39,11 foiz mis ko‘pikka ajralib chiqadi. Flotatsiyaning 5-daqqasiga kelib, yana 26,06 foiz metall ajratib olinadi va dastlabki 5 daqiqalik intensiv bosqichda jami misning 65,17 foizi konsentratga o‘tadi. 8- va 12-daqqalarda esa ko‘pikka chiqish sur‘ati mos ravishda 8,71 foiz va 2,13 foizgacha sekinlashadi. Bu kinetik bog‘liqlik yangi to‘plovchi reagentning yuqori kinetik faollikka ega ekanligini hamda boyitish siklining dastlabki daqiqalaridayoq asosiy foydali komponentlarni tezkor ajratib olish imkonini berishini isbotlaydi.

Jarayonning ilmiy-texnologik mohiyati va qo‘llanilishi quyidagi fundamental prinsiplarga tayanadi:

Elektrokimyoviy nazorat: pulpa muhitiga

o‘rnatilgan maxsus ion-selektiv sulfidli elektrodlar yordamida tizimning potentsiali (odatda -300 mV dan -500 mV gacha bo‘lgan oraliqda) doimiy o‘lchab boriladi. Bu sulfidlovchi reagent (Na_2S yoki $NaHS$) miqdorini aniq dozlash imkonini beradi.

Depressiyani bartaraf etish: An‘anaviy usulda sulfidizator bir marta ko‘p miqdorda solinganda, pulpadagi ortiqcha S^{2-} ionlari mis minerallari yuzasini qoplab, kollektor (ksantogenat) adsorbsiyasini bloklaydi (depressiyalaydi). CPS texnologiyasi reagentni porsiyalar bilan muvozanatli yuborib, ushbu salbiy effektini butunlay yo‘q qiladi.

Sirt modifikatsiyasi (kinetika): Nazorat qilinadigan muhitda sulfid ionlari malaxit yoki azurit kabi gidrofil minerallarning kristall panjarasidagi kislorod va karbonat guruhlar bilan jadal almashinadi. Natijada mineral yuzasida gidrofob xususiyatga ega bo‘lgan o‘ta yupqa, sun‘iy xalkopiritsimon (CuS) parda hosil bo‘ladi va u kollektor bilan mustahkam birikadi. Ushbu texnologiya xalqaro miqyosda mineral xomashyodan metall ajratib olish foizini 15–20% gacha oshirish va reagentlar sarfini sezilarli darajada tejash uchun qo‘llaniladi.

Xulosa. Oksidlangan va aralash mis rudalarini (malaxit, azurit, xrizokolla) an‘anaviy usullarda flotatsiyalash mineral yuzasining yuqori gidrofilligi sababli samarasiz bo‘lib, ularni boyitishdan oldin Na_2S yoki $NaHS$ reagentlari bilan sun‘iy sulfidlash majburiy texnologik zaruriyat hisoblanadi.

Xalqaro korxonalar (Kansanshi, Bozshakol, Olmaliq KMK) tajribasi shuni ko‘rsatadiki, pulpadagi sulfid ionlari konsentratsiyasini elektrokimyoviy salohiyat (Eh) orqali nazorat qiluvchi CPS texnologiyasini joriy etish faollashtiruvchi reagentlar sarfini sezilarli darajada tejash va mineral depressiyasini butunlay bartaraf etish imkonini beradi.

Minerallar yuzasi muvaffaqiyatli sulfidlangandan so‘ng, PAX yoki PBX kabi kuchli to‘plovchi reagentlar kombinatsiyasini qo‘llash qiyin boyitiluvchi oksidlangan xomashyolardan tayyor konsentratga metall ajratib olish foizini (извлечение) barqaror oshirishning bosh omilidir.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

- [1] Wills, B. A., & Finch, J. A. (2015). Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Butterworth-Heinemann.
- [2] Kalichini, M. S. (2015). A study of the flotation characteristics of a complex copper ore. University of Cape Town.
- [3] Chabuka, C., & Witika, L. K. (2001). Controlled potential sulphidisation (CPS) application in Zambian copper oxide flotation circuits. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 101(6), 295–301.
- [4] Lee, K., Archibald, D., McLean, J., & Reuter, M. A. (2009). Flotation of mixed copper oxide and sulphide minerals with xanthate and hydroxamate collectors. Minerals Engineering, 22(4), 395–401.
- [5] Bulatovic, S. M. (2010). Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice: Volume 2: Flotation of Gold, PGM and Oxide Minerals. Elsevier.
- [6] Yusupxodjayev, A. A., & Mutalov, S. S. (2018). O‘zbekiston aralash va oksidlangan mis rudalarini boyitish texnologiyalarini takomillashtirish. Toshkent davlat texnika universiteti ilmiy to‘plami.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Maxmarejabov, D. B., Abdurasulova, Z. X., Asilov, S. N., & Jabborov, E. Y. (2026). Oksidlangan va aralash tipdagi mis rudalarini to‘plovchi reagent yordamida flotatsiyalashni o‘rganish. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.12>

UO'K: 622.765.061:622.343

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.14

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

OKSIDLANISHGA UCHRAGAN MIS PORFIR MA'DANLARNI FAOLLASHTIRUVCHI REAGENT BILAN FLOTATSIYALASH MEKANIZMINI O'RGANISH



**Maxmarejabov Dilmurod
Baxtiyarovich**

Texnika fanlari doktori, dotsent,
O'zbekiston Respublikasi Prezidenti
Administratsiyasi huzuridagi Ta'lim
sifatini ta'minlash milliy agentligi
bosh inspektori, Toshkent,
O'zbekiston
E-mail: dmahmarejabov@mail.ru
Science ID: FQD-0425-0018



**Abdurasulova Zarina
Xusniddinovna**

Islom Karimov nomidagi Toshkent
davlat texnika universiteti,
Toshkent, O'zbekiston,
E-mail:
zarinaabdurasulova77@gmail.com
ORCID ID: 0009-0006-2687-9916
Science ID: MTV-0525-0043



**Botirov Mirmuxsin
Sherali o'g'li**

"Mineral resurslar instituti" DM
Kichik ilmiy xodim, Toshkent,
O'zbekiston
E-mail: mirmuxsin1994@mail.ru
ORCID ID: 0009-0007-0280-8563
Science ID: MSN-0525-0168



**Sodiqov Farrux Sobirjon
o'g'li**

"Mineral resurslar instituti" DM
kichik ilmiy xodimi, Toshkent,
O'zbekiston,
E-mail: sobirovich.fs@mail.ru
ORCID ID: 0009-0002-7637-954X
Science ID: MFR-0525-0078

Annotatsiya. Laboratoriya sinovlari davomida ushbu gidrofil oksidlangan minerallar yuzasida anion almashinuvi mexanizmi asosida o'ta yupqa sun'iy kovellinsimon (CuS) parda hosil qilish uchun NaHS (natriy gidrosulfid) reagentining turli dozalari ta'siri o'rganildi. Tajribalar natijasiga ko'ra, NaHS ning maqbul (optimal) sarf miqdori 350 g/t deb belgilandi va ushbu nuqtada boyitma sifati maksimal 20,52% Cu ga, metallning ajralib olish darajasi (izvlecheniye) esa 71,52% ga yetishi, chiqindidagi mis miqdori esa 0,036% gacha kamayishi isbotlandi. Reagent sarfi 600 g/t gacha oshirilganda, pulpadagi erkin gidrosulfid ionlarining ko'payishi va to'plovchi ksantogenat adsorbsiyasining bloklanishi (depressiya effekti) hisobiga ajralish ko'rsatkichi 49,22% gacha keskin pasayishi aniqlandi. Olingan natijalar asosida, reagentlarning salbiy depressiya effektini bartaraf etish va pulpa elektrokimyoviy salohiyatini (Eh) doimiy boshqarish uchun sanoatda CPS (Controlled Potential Sulphidisation) avtomatlashtirilgan texnologiyasini joriy etishning ilmiy zaruriyati to'liq asoslab berildi.

Kalit so'zlar: aralash mis rudasi, fazaviy tahlil, flotatsiya, faollashtiruvchi reagent, natriy gidrosulfid (NaHS), CPS texnologiyasi, metall ajratib olish, depressiya effekti.

Received: 23.07.2026

Accepted: 23.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФЛОТАЦИИ ПОДВЕРГШИХСЯ ОКИСЛЕНИЮ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕАГЕНТА-АКТИВАТОРА

**Махмарежабов
Дилмурод
Бахтиярович**

Доктор технических наук,
доцент, главный инспектор
Национального агентства по
обеспечению качества
образования при Администрации
Президента Республики
Узбекистан, Ташкент,
Узбекистан

**Абдурасулова Зарина
Хусниiddиновна**

Ташкентский государственный
технический университет имени
Ислама Каримова, Ташкент,
Узбекистан

**Ботиров Мирмухсин
Шерали угли**

Младший научный сотрудник ГУ
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан

**Садиков Фаррух
Собиржон угли**

Младший научный сотрудник ГУ
«Институт минеральных
ресурсов», Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В ходе лабораторных исследований изучено влияние различных дозировок реагента NaHS (гидросульфид натрия) на формирование ультратонкой искусственной ковеллиноподобной (CuS) пленки на поверхности гидрофильных окисленных минералов по механизму анионного обмена. По результатам экспериментов оптимальный расход NaHS определен на уровне 350 г/т, что позволило достичь максимального качества концентрата 20,52% Cu при извлечении металла 71,52% и снижении содержания меди в хвостах до 0,036%. Установлено, что при увеличении расхода реагента до 600 г/т происходит резкое падение извлечения до 49,22% из-за избытка свободных гидросульфид-ионов в пульпе и блокирования адсорбции собирателя ксантогената (эффект депрессии). На основе полученных данных полностью обоснована научная необходимость внедрения автоматизированной технологии CPS (Controlled Potential Sulphidisation) для предотвращения депрессии и постоянного регулирования электрохимического потенциала (Eh) пульпы.

Ключевые слова: смешанная медная руда, фазовый анализ, флотация, активирующий реагент, гидросульфид натрия (NaHS), технология CPS, извлечение металла, эффект депрессии.

STUDY ON THE FLOTATION MECHANISM OF WEATHERED COPPER PORPHYRY ORES WITH THE APPLICATION OF AN ACTIVATOR REAGENT

**Maxmarejabov Dilmurod
Bakhtiyarovich**

Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor,
Chief Inspector of the National
Agency for Quality Assurance in
Education under the Administration
of the President of the Republic of
Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

**Abdurasulova Zarina
Xusniddinova**

Tashkent State Technical University
named after Islam Karimov,
Tashkent, Uzbekistan

**Botirov Mirmukhsin
Sherali ugli**

Junior Researcher, State Institution
"Institute of Mineral Resources",
Tashkent, Uzbekistan

**Sodiqov Farrukh
Sobirjon ugli**

Junior Researcher, State Institution
"Institute of Mineral Resources",
Tashkent, Uzbekistan

Abstract. During laboratory testing, the effect of varying dosages of the NaHS (sodium hydrosulfide) reagent was studied to evaluate the formation of an ultra-thin artificial covellite-like (CuS) film on the surface of hydrophilic oxidized minerals via an anion exchange mechanism. Experimental results indicated that the optimum NaHS consumption rate is 350 g/t. At this operational point, the maximum concentrate grade reached 20.52% Cu with a corresponding metal recovery rate of 71.52%, while the copper content in the tailings dropped to 0.036%. Conversely, increasing the reagent dosage to 600 g/t led to a sharp decline in recovery down to 49.22% due to an excess of free hydrosulfide ions in the pulp, which blocked the adsorption of the xanthate collector (depression effect). Based on these findings, the scientific necessity of implementing automated CPS (Controlled Potential Sulphidisation) technology in industrial settings was fully justified to mitigate the adverse depression effects and dynamically regulate the pulp's electrochemical potential (Eh).

Keywords: mixed copper ore, phase analysis, flotation, activating reagent, sodium hydrosulfide (NaHS), CPS technology, metal recovery, depression effect.

Kirish. Jahon va mahalliy mineral xomashyolarni boyitish amaliyotida tarkibida foydali komponentlar miqdori kam bo'lgan hamda gipergen o'zgarishlarga (tabiiy oksidlanishga) uchragan, qiyin boyitiluvchi ma'danlarni qayta ishlash ulushi tobora ortib bormoqda. Bunday xomashyolarga oksidlanishga uchragan va aralash tipdagi mis-porfir rudalarini yorqin misol sifatida keltirish mumkin. Ushbu turdagi konlarni, xususan, Olmaliq KMKga qarashli "Qalmoqqir" va "Yoshlik" konlari ma'danlarini keng ko'lamda sanoat qayta ishlashiga jalb etish barqaror xomashyo bazasini ta'minlashning asosiy shartidir. Biroq bunday rudalar tarkibida ikkilamchi gilli minerallar (shlamlar) va oksidlangan mis birikmalarining yuqori miqdorda uchrashi an'anaviy flotatsiya jarayonining selektivligini hamda standart to'plovchi reagentlarning gidrofobizatsiyalash qobiliyatini keskin pasaytiradi. Mayda dispersli shlam zarralari flotatsiya kameralarida yirik pufakchalar bilan gidrodinamik to'qnashish ehtimoli past bo'lganligi sababli an'anaviy texnologiyalarda chiqindiga o'tib ketadi va metallning qaytarib bo'lmaydigan isrof qilinishiga sabab bo'ladi. Shu bois oksidlanishga uchragan mis-porfir ma'danlarini samarali boyitish uchun pulpani oldindan konditsiyalash va mineral yuzasini kimyoviy faollashtirish usullarini ishlab chiqish, shuningdek, ularning mexanizmlarini nazariy jihatdan asoslash bugungi kunning eng dolzarb ilmiy-amaliy vazifalaridan biri hisoblanadi.

Hozirgi kunda mineral xomashyolarni boyitish sanoatida o'ta mayda va shlamli mis zarrachalarini ajratib olish an'anaviy flotatsiya usullarida gidrodinamik to'qnashish ehtimolining pastligi tufayli jiddiy muammo hisoblanadi. Ushbu muammoni hal etishda fazalararo mikro- va nanopusakchalar (MNB) yordamida pulpani oldindan konditsiyalash texnologiyasi eng istiqbolli yo'nalishlardan biri sifatida namoyon bo'lmoqda. Ilgari o'tkazilgan fundamental tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, gidrodinamik kavitatsiya mexanizmi orqali hosil qilingan ultramayda pufakchalar xalkopirit monominerali va tarkibi murakkab mis rudalarining flotatsiya ko'rsatkichlarini mos ravishda 24,5% va 7% ga oshirish imkonini beradi [1]. Shu bilan birga, MNPG mavjudligi pulpa muhitida asosiy kollektor reagenti bo'lgan natriy izopropil ksantogenatning (SIPX) mineral yuzasiga

adsorbsiyalanish samaradorligini o'rtacha 73,8% ga, uning kinetik tezligini esa 69,44% ga oshiradi [1]. Bu, o'z navbatida, mineral sirtining gidrofobligini keskin oshirib, termodinamik barqarorlikni ta'minlaydi [5]. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, barqaror nano- va mikropufakchalar o'ziga xos kinetik xususiyatlari tufayli tizimda ikkilamchi kollektor (ko-kollektor) vazifasini bajaradi. Bu hodisa sanoat sharoitida qimmatbaho kimyoviy reagentlar hamda ko'pirtirgichlar sarfini 30% dan 50% gacha qisqartirish imkonini beradi [2]. Pulpani nano-pufakchalar bilan oldindan intensiv konditsiyalash sanoat miqyosidagi murakkab minerallarda ham yuqori samara bergan [6]. Chunonchi, Chili porfir konlaridan olingan va tarkibida yuqori miqdorda gil (shlam) bo'lgan mis-molibden sulfidli rudalar flotatsiyasida nano-pufakchalar qo'llanilganda, sof tizimlarda misni ajratib olish ko'rsatkichi 7,5% ga, molibdenni ajratish samaradorligi esa 20% ga oshgani tajribalarda isbotlangan [3]. Biroq gil minerallarining salbiy ta'sirini kamaytirish uchun nano-pufakchalar oqimining gidrodinamik parametrlari va o'lchamlarini qat'iy nazorat qilish talab etiladi [3]. Konditsiyalash samaradorligini oshirish maqsadida maxsus loyihalashtirilgan Venturi trubkali kavitatsiya generatori pulpa oqimida yuqori energiyali dissipatsiya zonalarini hosil qiladi [8]. Ushbu qurilma yordamida amalga oshirilgan flotatsiya jarayonida o'ta mayda zarrachalar yuzasida mikropufakchalarning selektiv yadrolanishi kuzatiladi va bu texnologiya tarkibi murakkab bo'lgan polimetallik qo'rg'oshin-mis (Pb-Cu) sulfidli rudalarni yuqori selektivlik bilan ajratish kinetikasini tubdan kuchaytiradi [4]. Bunday fazalararo gidrofob pufak guruhlari mayda mineral shlamlarini o'zaro birlashtirib, «pufak ko'prigi» (bubble bridging) effekti orqali mustahkam aeroflokulalar hosil qiladi [5]. Mazkur barqaror komplekslar yirik pufakchalar bilan to'qnashganda gidrodinamik to'siqlarni osongina yengib o'tadi va flotatsiya kamerasining ko'pik qatlamiga ko'tarilish tezligini 2–3 barobarga oshiradi [6]. Bundan tashqari, flotatsiyadan oldin pulpaga nano-pufakchalarni kiritish tizimdagi erigan kislorod miqdorini me'yorlashtiradi hamda mineral yuzasining elektrokimyoviy potensialini (zeta-potensialini) o'zgartiradi [7]. Bu esa sulfidli mis minerallarining selektiv faollashuvini osonlashtirib,

depressorlar ta'siriga chidamliligini oshiradi [7]. Sanoat miqyosidagi ejektorli nano-pufak generatorlarining gidrodinamik rejimlarini matematik modellashtirish shuni ko'rsatadiki, pufakchalar o'lchami 100 nm dan 500 nm gacha bo'lganda, ularning mineral yuzasida mavjud bo'lish muddati (barqarorligi) maksimal darajaga yetadi va sirt energiyasini kamaytiradi [8]. Bu, o'z navbatida, shlamli chiqindilar tarkibida qolib ketayotgan mis zarrachalarini ikkilamchi qayta ishlashda va boyitish fabrikalarining umumiy texnologik ko'rsatkichlarini yaxshilashda muhim uskunaviy yechim hisoblanadi [9]. Xulosa qilib aytganda, fazalararo MNPG texnologiyasini joriy etish mis ishlab chiqarish sanoatida ham iqtisodiy tejankorlikka (reagentlarni tejash hisobiga), ham ekologik xavfsizlikka (oqova suvlardagi kimyoviy yuklamani kamaytirish orqali) erishish imkonini beradi [10].

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Mineral xomashyolarni boyitish sanoatida o'ta mayda va shlamli mis zarrachalarini ajratib olishda an'anaviy flotatsiya usullarining past samaradorligi muammosini hal etishda fazalararo mikro- va nanopufakchalar (MNB) yordamida pulpani oldindan konditsiyalash texnologiyasi eng istiqbolli va fundamental asoslangan yo'nalish hisoblanadi. Gidrodinamik kavitatsiya mexanizmi orqali hosil qilingan ultra mayda pufakchalar xalkopirit monominerali va murakkab mis rudalari flotatsiyasini mos ravishda 24,5% va 7% ga oshirish bilan birga, pulpa muhitida asosiy kollektor reagenti bo'lgan natriy izopropil ksantogenatning (SIPX) mineral yuzasiga adsorbsiyalanish samaradorligini 73,8% ga va kinetik tezligini 69,44% ga jadallashtiradi. Tizimda ikkilamchi kollektor vazifasini bajaruvchi ushbu barqaror nano- va mikropufakchalar mineral sirtining gidrofobligi hamda termodinamik barqarorligini keskin oshirishi hisobiga sanoat sharoitida qimmatbaho kimyoviy reagentlar va ko'pirtirgichlar sarfini 30% dan 50% gacha qisqartirish imkonini beradi. Ushbu texnologiyani trubkali kavitatsiya generatorlari yoki elektrodlil qurilmalar yordamida tatbiq etish yuqori miqdorda gil saqlagan mis-molibden va murakkab polimetallik qo'rg'oshin-mis (Pb-Cu) sulfidli rudalarini bir-biridan yuqori selektivlik bilan ajratish kinetikasini tubdan kuchaytiradi. Minerallar yuzasida mikropufakchalarning selektiv yadro-

lanishi va «pufak ko'prigi» effekti orqali hosil bo'ladigan mustahkam aeroflokulalar yirik pufakchalar bilan to'qnashganda gidrodinamik to'siqlarni osongina yengib o'tadi hamda flotatsiya kamerasining ko'pik qatlamiga ko'tarilish tezligini 2–3 barobarga oshiradi. Bundan tashqari, o'lchami 100 nm dan 500 nm gacha bo'lgan nanopufakchalar tizimdagi erigan kislorod miqdorini normallashtirib, mineral yuzasining zeta-potensialini o'zgartiradi va shu orqali sulfidli mis minerallarining selektiv faollashuvini osonlashtirib, depressorlar ta'siriga chidamliligini oshiradi. Matematik va gidrodinamik modellashtirish asosida pufakchalar oqimi parametrlarini qat'iy nazorat qilish shlamli chiqindilar tarkibida qolib ketayotgan mis zarrachalarini ikkilamchi qayta ishlashda va boyitish fabrikalarining umumiy texnologik chiqish ko'rsatkichlarini yaxshilashda muhim uskunaviy yechim hisoblanadi. Xulosa qilib aytganda, fazalararo mikro- va nanopufakchalar texnologiyasining joriy etilishi mis ishlab chiqarish sanoatida reagentlarni tejash hisobiga yuqori iqtisodiy samaradorlikka erishish hamda oqova suvlardagi kimyoviy yuklamani kamaytirish orqali ekologik xavfsizlikni ta'minlash imkonini beruvchi kompleks innovatsion yondashuvdir.

1-jadval

**Ma'dan namunasining mis metali bo'yicha
fazaviy tahlili natijalari**

Misning birikish shakllari (fazalar)	Mineralogik tarkibi	Misning faza bo'yicha ulushi, %	Ma'dandagi sof metall miqdori, %
Birlamchi sulfidlar	Xalkopirit (CuFeS ₂), bornit (Cu ₅ FeS ₄)	40,0	0,126
Ikkilamchi sulfidlar	Xalkozin (Cu ₂ S), kovellin (CuS)	20,0	0,063
Oksidlangan minerallar (karbonat/oksid)	Malaxit, azurit, kuprit	28,0	0,088
Silikatli (qiyin flotatsiyalanuvchi)	Xrizokolla (CuSiO ₃ ·nH ₂ O)	10,0	0,032
Suvda eruvchan sulfatlar	Xalkantit (CuSO ₄ ·5H ₂ O)	2,0	0,006
JAMI:	—	100,0%	0,315%

1-jadval ma'lumotlariga ko'ra, taqdim etilgan fazaviy tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, dastlab tarkibida 90–95% xalkopirit bo'lgan va 20 yil davomida tabiiy atmosfera sharoitida oksidlanishga uchragan ruda tubdan mineralogik o'zgarishlarga duch kelgan. Birlamchi sulfidli mis ulushi 40,0% gacha kamaygan bo'lsa, gipergen jarayonlar

hisobiga 20,0% ikkilamchi sulfidlar (xalkozin va kovellin) hamda jami 38,0% oksidlangan va silikatli fazalar (malaxit, azurit, xrizokolla) shakllangan. Bu ko'rsatkichlar rudaning to'liq sulfidli turdan murakkab aralash (sulfid-oksid) turiga o'tganligini ilmiy jihatdan isbotlaydi.

Natijalar va muhokama. Tarkibida 0,315% mis bo'lgan kambag'al va aralash (20 yil davomida oksidlanishga uchragan) ruda namunalari boyitishda NaHS (natriy gidrosulfid) faollashtiruvchi reagentining turli sarf dozalarining texnologik ko'rsatkichlarga ta'siri quyidagicha tahlil qilindi:

1-jadval

**Turli dozadagi NaHS faollashtiruvchisi
ishtirokida misni boyitish jarayonining
laboratoriya sinovlari natijalari**

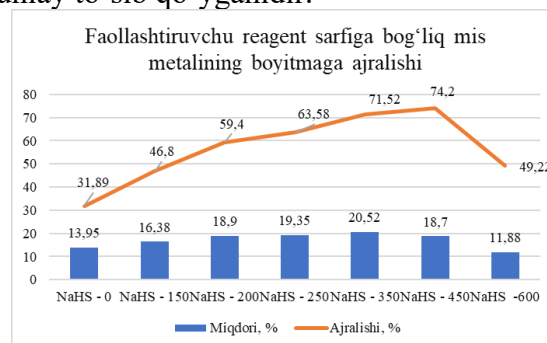
Mahsulotlar nomi	Chiqishi, %	Miqdori, %	Ajralishi, %	Faollashtiruvchi reagent NaHS sarfi, g/t
		Cu	Cu	
Boyitma	0,8	13,95	31,89	NaHS – 0
Oraliq mahsulot	2,2	0,5	3,11	
Chiqindi	97	0,2	65	
Dastlabki mahsulot	100	0,315	100	
Boyitma	1	16,38	46,8	NaHS – 150
Oraliq mahsulot	2,8	0,63	5,04	
Chiqindi	96,2	0,139	48,16	
Dastlabki mahsulot	100	0,315	100	
Boyitma	1,1	18,9	59,4	NaHS – 200
Oraliq mahsulot	3,3	0,86	8,06	
Chiqindi	95,6	0,083	32,54	
Dastlabki mahsulot	100	0,315	100	
Boyitma	1,15	19,35	63,58	NaHS – 250
Oraliq mahsulot	3,5	0,77	7,65	
Chiqindi	95,35	0,07	28,77	
Dastlabki mahsulot	100	0,315	100	
Boyitma	1,22	20,52	71,52	NaHS – 350
Oraliq mahsulot	4,1	0,74	8,65	
Chiqindi	94,68	0,036	19,83	
Dastlabki mahsulot	100	0,315	100	
Boyitma	1,25	18,7	74,2	NaHS – 450
Oraliq mahsulot	4,3	0,65	8,8	
Chiqindi	94,45	0,057	17	
Dastlabki mahsulot	100	0,315	100	
Boyitma	1,45	11,88	49,22	NaHS – 600
Oraliq mahsulot	4,8	0,59	8,02	
Chiqindi	93,75	0,123	42,76	
Dastlabki mahsulot	100	0,315	100	

Reagent qo'llanilmagan holat (NaHS=0 g/t):

Faollashtiruvchi reagent ishtirok etmaganda, boyitmaga misning ajralishi o'ta past bo'lib, atigi 31,89% ni tashkil etdi, boyitma sifati esa 13,95% Cu darajasida qoldi. Bu ko'rsatkich rudadagi faqat oson flotatsiyalanuvchi erkin sulfidli minerallar (xalkopirit, xalkozin) ko'pikka chiqqanini, oksidlangan karbonatli fazaning (malaxit, azurit) esa deyarli to'liq chiqindiga (chiqindidagi Cu miqdori 0,2%) o'tib ketganini ko'rsatadi.

Reagent dozasi oshirish va optimal nuqta (NaHS=150–350 g/t): Reagent sarfi 150 g/t dan 350 g/t gacha bosqichma-bosqich oshirilganda, boyitish ko'rsatkichlarining to'g'ri proporsional ravishda o'sib borishi kuzatildi. Eng yuqori va optimal ko'rsatkich NaHS sarfi 350 g/t bo'lganda qayd etildi. Ushbu nuqtada boyitmaning sifati maksimal 20,52% misga, undagi metallning ajralish darajasi esa 71,52% ga yetdi. Bu holat pulpadagi gidrosulfid ionlari miqdori oksidlangan mis minerallari yuzasida to'liq va mustahkam sun'iy sulfidli parda hosil qilish uchun yetarli bo'lganidan dalolat beradi. Natijada, chiqindidagi mis miqdori eng minimal nuqtaga (0,036% Cu) tushdi.

Reagent dozasi oshirish me'yoridan oshib ketishi va depressiya effekti (NaHS=450–600 g/t): NaHS sarfi 450 g/t ga yetganda, ajralish biroz oshgan bo'lsa-da (74,2%), boyitma sifati 18,7% gacha pasaydi. Reagent sarfi 600 g/t ga oshirilganda esa jarayonda keskin depressiya (cho'kish) effekti yuz berdi: misning boyitmaga ajralishi 49,22% gacha, uning sifati esa 11,88% gacha pasaydi. Buning asosiy sababi — pulpadagi ortiqcha erkin sulfid ionlari (HS^-) va (S^{2-}) mis minerallari yuzasini o'ta qalin qoplab, to'plovchi reagent (ksantogenat) ionlarining sirtga adsorbsiyalanishini (yopishishini) butunlay to'sib qo'yanidir.



1-rasm. NaHS faollashtiruvchi reagenti sarfining mis miqdori va boyitmaga ajralish ko'rsatkichlariga ta'sirini solishtirish diagrammasi.

Oksidlangan mis minerallari tabiatan gidrofil (suvni oson shimuvchi) bo'lib, ularning sirtida to'plovchi reagent (ksantogenat) ionlari adsorbsiyalana olmaydi. NaHS reagentining bosh vazifasi — oksidlangan mineral sirtini sun'iy ravishda sulfidlash (sulfidizatsiya), ya'ni uning yuzasida sulfidli minerallarga (xalkopirit, xalkozin kabi) xos bo'lgan gidrofob parda hosil qilishdir.

Jarayon pulpa muhitida ma'dan zarrachalari va reagent ionlari o'rtasida bir nechta ketma-ket bosqichda kechadi. Gidroliz va ionlanish: NaHS suvda eriganda gidrosulfid (HS^-) va sulfid (S^{2-}) ionlarini hosil qiladi. Anion almashinuvi (sirt modifikatsiyasi): pulpadagi (HS^-) va (S^{2-}) ionlari oksidlangan mis mineralining (masalan, malaxit) yuzasiga ta'sir qiladi. Mineralning kristall panjarasidagi karbonat (CO_3^{2-}) yoki gidroksil (OH^-) guruhlari sulfid ionlari bilan almashadi. Hosil bo'lgan yangi sulfidli yuza endi to'plovchi reagent — ksantogenat (masalan, PAX yoki PBX) ionlarini o'ziga osonlikcha adsorbsiyalaydi (biriktiradi). Ksantogenat mineralni gidrofob (suvni qaytaruvchi) holatga keltirib, uning havo pufakchalariga yopishib, ko'pikka chiqishini ta'minlaydi.

Xulosa. Tabiiy-atmosfera va texnogen sharoitda saqlangan, dastlab 90–95% xalkopiritdan iborat bo'lgan ma'danlarning fazaviy tahlili shuni ko'rsatdiki, gipergen jarayonlar natijasida birlamchi sulfidli mis ulushi 40,0% gacha kamayib, ruda tarkibida 20,0% ikkilamchi sulfidlar hamda 38,0% qiyin boyitiluvchi oksidlangan va silikatli fazalar

shakllangan. Umumiy mis miqdori 0,315% bo'lgan ushbu xomashyo to'liq aralash (sulfid-oksidi) turiga o'tganligi sababli, uni an'anaviy flotatsiya usulida to'g'ridan-to'g'ri boyitish samarasiz hisoblanadi.

Oksidlangan mis minerallarining yuqori gidrofilligini bartaraf etish va mineral yuzasini faollashtirish uchun NaHS (natriy gidrosulfid) reagentidan foydalanish majburiy texnologik zaruriyat ekanligi ilmiy va amaliy jihatdan asoslandi. Pulpa muhitida NaHS gidrolizi natijasida hosil bo'lgan (HS^-) va (S^{2-}) ionlari malaxit hamda azurit kabi minerallarning kristall panjarasidagi karbonat va gidroksil guruhlari bilan anion almashinuvi reaksiyasiga kirishib, mineral yuzasida o'ta yupqa, molekulyar darajadagi gidrofob kovellinsimon (CuS) parda hosil qilishi aniqlandi.

Laboratoriya sinovlari natijalariga ko'ra, NaHS reagentining ushbu aralash ruda uchun maqbul (optimal) sarf miqdori 350 g/t deb belgilandi. Ushbu dozada mineral yuzasining to'liq sulfidlanishi hisobiga boyitma sifati maksimal 20,52% Cu ga, metallning ajralib olish darajasi esa 71,52% ga yetdi hamda chiqindidagi mis miqdori minimal ko'rsatkichgacha (0,036%) kamaydi. Reagent sarfining 600 g/t gacha oshirilishi esa pulpa eritmasida erkin gidrosulfid ionlarining ortib ketishi va to'plovchi ksantogenat adsorbsiyasining blokalanishi (depressiya effekti) hisobiga ajralish ko'rsatkichining 49,22% gacha keskin pasayishiga olib keldi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Barbouchi, A., Ayadi, S., Idouhli, R., Khadiri, M. E., Abouelfida, A., Barfoud, L., Faqir, H., Benzakour, I., Benzakour, J. (2025). Highly efficient pretreatment for refractory gold ores using persulfate, catalyst and free radical based advanced oxidation processes to improve cyanidation. *Hydrometallurgy*, 235.
- [2] Mesa Espitia, S. L., & Lapidus, G. T. (2015). Pretreatment of a refractory arsenopyritic gold ore using hydroxyl ion. *Hydrometallurgy*, 153, 106–113.
- [3] Rodríguez-Rodríguez, C., Nava-Alonso, F., & Uribe-Salas, A. (2018). Arsenopyrite oxidation with ozone: Stoichiometry and kinetics. *Ozone: Science & Engineering*, 40, 284–292.
- [4] Barbouchi, A., Er-Raqi, I., Hamchi, M., Idouhli, R., Khadiri, M., Abouelfida, A., El Alaoui-Chrifi, M. A., Faqir, H., Benzakour, I., & Benzakour, J. (2024). Chemical oxidation of arsenopyrite by strong oxidizing agents: For oxidative pretreatment of refractory arsenopyritic gold ores. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 185–194.
- [5] Barbouchi, A., Louarrat, M., Mikali, M., Barfoud, L., El Alaoui-Chrifi, M. A., Faqir, H., Benzakour, I., Idouhli, R., Khadiri, M. E., & Benzakour, J. (2024). Advancements in improving gold recovery from refractory gold ores/concentrates: A review. *Canadian Metallurgical Quarterly*

- [6] Hammerschmidt, J., Guntner, J., Kerstiens, B., & Charitos, A. (2016). Roasting of gold ore in the circulating fluidized-bed technology. In Gold ore processing: Project development and operations.
- [7] Miller, P., & Brown, A. R. G. (2016). Bacterial oxidation of refractory gold concentrates. In Gold ore processing: Project development and operations.
- [8] Thomas, K. G., & Pearson, M. S. (2016). Pressure oxidation overview. In Gold ore processing: Project development and operations.
- [9] Badri, R., & Zamankhan, P. (2013). Sulphidic refractory gold ore pre-treatment by selective and bulk flotation methods. Advanced Powder Technology.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Maxmarejabov, D. B., Abdurasulova, Z. X., Botirov, M. S., & Sodiqov, F. S. (2026). Oksidlanishga uchragan mis porfir ma'danlarni faollashtiruvchi reagent bilan flotatsiyalash mexanizmini o'rganish. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.14>

UO‘K: 528.8:528.481:622.1

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.20

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

RADAR INTERFEROMETRIYASI (INSAR) TEXNOLOGIYASINING NAZARIY ASOSLARI VA YER YUZASI DEFORMATSIYALARINI MONITORING QILISH IMKONIYATLARI



Botirov Shoxbos Soibjon o'g'li

Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti katta
o'qituvchisi, Termiz, O'zbekiston
E-mail: shoxbos.b@mail.ru
ORCID ID: 0009-0002-3045-4217



Nomdorov Rustam Uralovich

Qarshi davlat texnika universiteti "Geologiya va konchilik ishi"
kafedrasini, t.f.f.d., dotsent, Qarshi, O'zbekiston
E-mail: rustamnmdorov@mail.ru
ORCID ID: 0009-0000-6987-8995

Annotatsiya. Mazkur maqolada radar interferometriyasi (InSAR) texnologiyasining nazariy asoslari, sintezlangan aperturali radar (SAR) tizimlarining ishlash prinsipi hamda yer yuzasi deformatsiyalarini masofadan monitoring qilish imkoniyatlari yoritilgan. Radiolokatsion signallarning amplituda va faza xususiyatlari asosida interferometrik tahlilni amalga oshirish, deformatsiyalarni millimetr aniqlikda baholash va geodinamik jarayonlarni kuzatish usullari bayon etilgan. Shuningdek, elektromagnit to'liqlarning X , C va L diapazonlari, ularning fizik xususiyatlari hamda monitoring aniqligiga ta'siri tahlil qilingan. D-InSAR usulining konchilik hududlari, seysmik faol zonalar va boshqa murakkab geologik sharoitlarda qo'llanish afzalliklari ko'rsatib berilgan. Maqolada interferometrik kuzatuvlarning ishonchligini ta'minlovchi asosiy omillar, jumladan, kogerentlik, raqamli balandlik modeli, takroriy suratga olish davriyligi va radar ma'lumotlarini qayta ishlash talablari yoritilgan. Olingan ilmiy xulosalar InSAR texnologiyasining marksheyderlik, geodeziya, geologiya hamda konchilik amaliyotida deformatsiyalarni erta aniqlash, xavfli hududlarni baholash va monitoring samaradorligini oshirishdagi muhim ahamiyatini asoslaydi. Tadqiqot natijalari zamonaviy masofadan zondlash texnologiyalarini rivojlantirish, geotexnik xavflarni kamaytirish va hududlar barqarorligini ta'minlash uchun nazariy hamda amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: radar interferometriyasi (InSAR), sintezlangan aperturali radar (SAR), D-InSAR, SBAS-InSAR, masofadan zondlash, yer yuzasi deformatsiyasi, geomexanik monitoring, geodinamik jarayonlar, C -diapazon, radar tasvirlari, deformatsiyalar monitoringi, geofazoviy tahlil, marksheyderlik, sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari, konchilik monitoringi.

Received: 20.07.2026

Accepted: 01.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ (INSAR) И ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ботиров Шохбос Соибжон угли

Старший преподаватель, Термезский государственный
университет инженерии и агротехнологий, Термез,
Узбекистан

Номдоров Рустам Уралович

Доктор философии по техническим наукам, доцент, кафедра
«Геология и горное дело», Карагинский государственный
технический университет, Караши, Узбекистан

Аннотация. В данной статье рассмотрены теоретические основы технологии радиолокационной интерферометрии (InSAR), принцип функционирования систем радиолокации с синтезированной апертурой (SAR), а также возможности дистанционного мониторинга деформаций земной поверхности. Изложены методы интерферометрического анализа, основанные на амплитудных и фазовых характеристиках радиолокационных сигналов, позволяющие оценивать деформации с миллиметровой точностью и осуществлять мониторинг геодинамических процессов. Проанализированы особенности электромагнитных волн X-, C- и L-диапазонов, их физические свойства и влияние на точность мониторинга. Показаны преимущества применения метода D-InSAR при исследованиях горнодобывающих территорий, сейсмоактивных зон и других сложных геологических объектов. Рассмотрены основные факторы, обеспечивающие достоверность интерферометрических наблюдений, включая когерентность, цифровую модель рельефа, периодичность повторных съёмок и требования к обработке радиолокационных данных. Полученные научные результаты обосновывают значимость технологии InSAR для раннего выявления деформаций, оценки потенциально опасных участков и повышения эффективности мониторинга в маркшейдерии, геодезии, геологии и горном деле. Результаты исследования создают теоретическую и практическую основу для дальнейшего развития технологий дистанционного зондирования, снижения геотехнических рисков и обеспечения устойчивости территорий.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия (InSAR), радиолокация с синтезированной апертурой (SAR), D-InSAR, SBAS-InSAR, дистанционное зондирование, деформация земной поверхности, геомеханический мониторинг, геодинамические процессы, C-диапазон, радиолокационные изображения, мониторинг деформаций, геопространственный анализ, маркшейдерское дело, спутниковые данные, мониторинг горных работ.

THEORETICAL FOUNDATIONS OF INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR (INSAR) TECHNOLOGY FOR GROUND SURFACE DEFORMATION MONITORING

Botirov Shoxbos Soibjon ugli

Senior Lecturer, Termez State University of Engineering and Agrotechnologies, Termez, Uzbekistan

Nomdorov Rustam Uralovich

Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Geology and Mining, Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. This article presents the theoretical foundations of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology, the operating principles of Synthetic Aperture Radar (SAR) systems, and their capabilities for remote monitoring of ground surface deformation. Interferometric analysis methods based on the amplitude and phase characteristics of radar signals are described, enabling millimeter-level deformation measurements and continuous monitoring of geodynamic processes. The physical characteristics of electromagnetic waves in the X-, C-, and L-bands and their influence on monitoring accuracy are analyzed. The advantages of Differential InSAR (D-InSAR) for monitoring mining areas, seismically active regions, and other complex geological environments are discussed. The study also examines the key factors affecting the reliability of interferometric observations, including coherence, digital elevation models, repeat-pass acquisition intervals, and radar data processing requirements. The obtained results demonstrate the significance of InSAR technology for the early detection of ground deformation, assessment of hazardous areas, and improvement of monitoring efficiency in mine surveying, geodesy, geology, and mining engineering. The research findings provide a solid theoretical and practical basis for the further development of remote sensing technologies, mitigation of geotechnical hazards, and enhancement of territorial stability.

Keywords: Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), Synthetic Aperture Radar (SAR), D-InSAR, SBAS-InSAR, remote sensing, ground surface deformation, geomechanical monitoring,

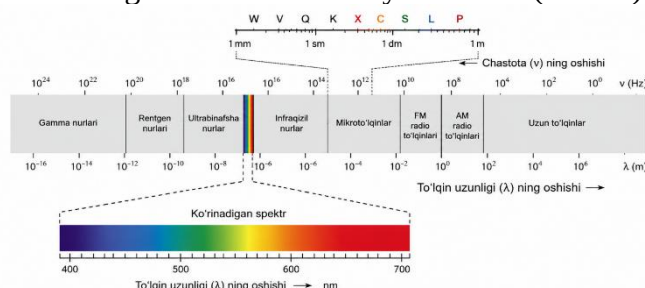
geodynamic processes, C-band, radar imagery, deformation monitoring, geospatial analysis, mine surveying, satellite data, mining monitoring.

Kirish. Radar interferometriyasining nazariy asosini sintezlangan aperturali radar (SAR) tizimlari yordamida olingan radiolokatsion tasvirlardan foydalanish tashkil etadi. Mazkur tizimlar sun'iy yo'ldoshlarga o'rnatilgan bo'lib, yer yuzasining bir xil uchastkasini takroriy suratga olish orqali interferometrik juftliklarni shakllantiradi. Ushbu tasvirlarning fazaviy farqini tahlil qilish natijasida relyefning geometrik xususiyatlari hamda vaqt davomida yuzaga kelgan deformatsiyalar aniqlanadi. Radiolokatsion zondlash usulining ishlash prinsipi elektromagnit to'lqinlarning yer yuzasi va undagi obyektlardan aks etish xususiyatiga asoslanadi. Radar antennasi tomonidan uzatilgan signal yer yuzasidan qaytgach qabul qilinadi va uning amplituda hamda faza parametrlarini tahlil qilish orqali kuzatilayotgan hududning fizik-geometrik tavsifi aniqlanadi [1].

Radiolokatsion texnologiyalarning shakllanishi elektromagnit to'lqinlar tabiatining o'rganilishi bilan uzviy bog'liqdir. XIX asr oxirida Heinrich Hertz elektromagnit to'lqinlarning mavjudligini tajribaviy jihatdan isbotlagan bo'lsa, keyinchalik 1904-yilda Christian Hülsmeyer radioto'lqinlarning aks etish hodisasidan foydalanib metall obyektlarni masofadan aniqlash usuliga patent olgan. Ushbu ishlanmalar radiolokatsion kuzatuv tizimlarining rivojlanishiga ilmiy asos yaratdi. Radiolokatsion texnologiyalarni amaliy jihatdan rivojlantirish ishlari XX asrning 30-yillari oxirida jadallashdi. Xususan, 1938-yilda Buyuk Britaniyada dastlabki radiolokatsion stansiyalar yaratildi va ularning takomillashishida Robert Watson-Watt muhim ilmiy-amaliy hissa qo'shdi. Ikkinchi jahon urushi davrida radar tizimlariga bo'lgan ehtiyojning ortishi ushbu texnologiyaning jadal rivojlanishiga turtki berdi hamda keyinchalik uning fuqaro sohalarida ham keng qo'llanilishiga zamin yaratdi.

SAR tizimlarining chastota diapazonlari va ularning yer yuzasi deformatsiyalarini monitoring qilishdagi imkoniyatlari. Radar interferometriyasi rivojlanishidagi muhim bosqichlardan biri 1991-yilda Yevropa kosmik agentligi (ESA) tomonidan ERS-1 sun'iy yo'ldoshining orbitaga chiqarilishi bilan bog'liq.

Mazkur apparat orqali olingan yuqori sifatli radiolokatsion tasvirlar interferometrik hisoblashlarning aniqligini sezilarli darajada oshirdi hamda yer yuzasi deformatsiyalarini muntazam monitoring qilish bo'yicha yangi ilmiy va amaliy imkoniyatlarni yaratdi. Bugungi kunda radiolokatsion ma'lumotlarni differensial interferometrik qayta ishlash (D-InSAR) yer yuzasi siljishlari va deformatsiyalarini aniqlashning eng samarali usullaridan biri sifatida e'tirof etiladi. Ushbu texnologiya turli davrlarda olingan SAR tasvirlarini o'zaro taqqoslash orqali deformatsiya maydonlarini millimetr darajasidagi aniqlikda aniqlash imkonini beradi. Shu sababli D-InSAR usuli konchilik hududlari, seysmik faol zonalar, vulqonlar va boshqa geodinamik obyektlarda monitoring olib borishda keng qo'llanilmoqda. Sintezlangan aperturali radar tizimlarida yer yuzasi cho'kishlarini aniqlash uchun, asosan, mikroto'lqin diapazonidagi elektromagnit nurlanishdan foydalaniladi (1-rasm).



1-rasm. Elektromagnit to'lqinlar umumiy spektrida mikroto'lqin diapazoni.

Radiolokatsion tizimlarda qo'llaniladigan tashuvchi chastota radar platformasining konstruktiv xususiyatlari hamda uning funksional vazifasiga bevosita bog'liq bo'lib, turli amaliy yo'nalishlarda turlicha diapazonlardan foydalaniladi [2].

Tashuvchi chastota qiymatiga qarab radar tizimlari bir necha chastota diapazonlariga ajratiladi va ularning asosiy texnik tavsiflari 1-jadvalda keltirilgan.

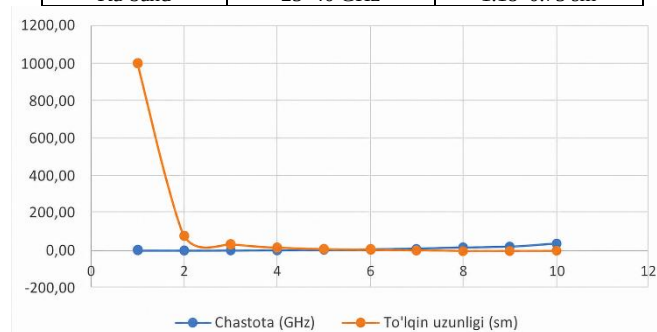
Hozirgi vaqtda sintezlangan aperturali radar (SAR) bilan jihozlangan sun'iy yo'ldosh tizimlarida, asosan, X-, C- va L-diapazonlari keng qo'llaniladi. Ushbu diapazonlarning har biri elektromagnit to'lqin uzunligi, fazaviy ajrata olish

qobiliyati, penetratsiya chuqurligi hamda kuzatuv sharoitlariga moslashuv darajasi bilan o'zaro farqlanadi. Shu sababli ularning tanlanishi kuzatuv obyektining turi va tadqiqot maqsadidan kelib chiqib amalga oshiriladi. SAR tizimlarining muhim afzalliklaridan biri mikroto'lqin diapazonidagi elektromagnit nurlanishdan foydalanishidir. Mazkur to'lqinlar bulut qoplami, tuman va yog'ingarchilik orqali yuqori darajada tarqalish xususiyatiga ega bo'lib, ob-havo sharoitidan deyarli mustaqil ravishda radiolokatsion kuzatuvlarni amalga oshirish imkonini beradi [3-4]. Elektromagnit to'lqinlarning atmosfera qatlamidan o'tish samaradorligi, avvalo, ularning to'lqin uzunligi bilan belgilanadi. Shu sababli turli chastota diapazonlari geologik, geodezik va geodinamik monitoring vazifalarini bajarishda o'ziga xos afzalliklarga ega hisoblanadi. [5-6].

1-jadval

**Radiolokatsion tizimlarda qo'llaniladigan
chastota diapazonlari**

Diapazon nomi	Chastota	To'lqin uzunligi
VHF	30–300 MHz	10–1 m
P-band	280–390 MHz	107–77 sm
UHF	300 MHz – 1 GHz	100–30 sm
L-band	1–2 GHz	30–15 sm
S-band	2–4 GHz	15–7.5 sm
C-band	4–8 GHz	7.5–3.75 sm
X-band	8–12.5 GHz	3.75–2.40 sm
Ku-band	8–12.5 GHz	2.40–1.67 sm
K-band	18–25 GHz	1.67–1.18 sm
Ka-band	25–40 GHz	1.18–0.75 sm



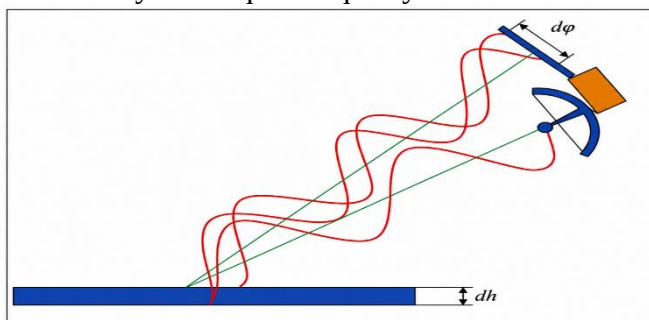
**2-rasm. Radiolokatsion tizimlarda qo'llaniladigan
chastota diapazonlari.**

Elektromagnit to'lqinlarning atmosfera qatlamidan o'tish qobiliyati, avvalo, ularning to'lqin uzunligi bilan belgilanadi. To'lqin uzunligi 2 sm dan ortiq bo'lgan radiosignallar bulut qatlamlari orqali sezilarli so'nishsiz tarqala oladi, 3–4 sm va undan uzun to'lqinlar esa yomg'ir tomchilari mavjud sharoitlarda ham yuqori darajada o'tuvchanlikni saqlab qoladi. To'lqin uzunligi radiolokatsion

signalning aks etish intensivligi hamda yer yuzasidan orqaga sochiluvchi elektromagnit nurlanishning xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli turli chastota diapazonlari kuzatilayotgan obyektlarning geometrik o'lchami, fizik xususiyatlari va sirt tuzilishiga qarab turlicha axborot beradi. L-diapazon (15,0–30,0 sm) uzun to'lqinli radiolokatsion nurlanishdan foydalanishi sababli, asosan, yirik o'lchamdagi obyektlardan kuchli qaytuvchi signal hosil qiladi. Bundan tashqari, ushbu diapazondagi elektromagnit to'lqinlar o'simlik va qor qoplami orqali qisman o'tish, ayrim geologik sharoitlarda esa qum hamda tuproq qatlamlariga ma'lum darajada kirib borish xususiyatiga ega. Shu sababli L-diapazon geologik tuzilishni o'rganish va o'simlik bilan qoplangan hududlarni kuzatishda samarali hisoblanadi. C-diapazon (3,8–7,5 sm) va X-diapazon (2,4–3,8 sm) esa qisqaroq to'lqin uzunligiga ega bo'lib, yer yuzasidagi kichik o'lchamli obyektlarni yuqori fazoviy aniqlik bilan ajratish imkonini beradi. Ushbu diapazonlarda radiolokatsion signal o'simlik, qor va tuproq sirtidan nisbatan kuchli aks etadi, bu esa yer yuzasining mayda tafsilotlarini aniqlashda muhim afzallik hisoblanadi.

Umuman olganda, elektromagnit to'lqin uzunligi ortishi bilan uning turli muhitlarga kirib borish qobiliyati ham ortadi. Aksincha, qisqa to'lqin diapazonlari atmosfera ta'siri, ayniqsa suv bug'i va yog'ingarchilikka nisbatan sezgirroq bo'ladi. Shu sababli radar diapazonini tanlash kuzatuv maqsadi, tabiiy-geografik sharoit hamda talab etiladigan aniqlik darajasini hisobga olgan holda amalga oshiriladi. Radar interferometriyasida deformatsiyalarni aniqlash aniqligi qo'llanilayotgan elektromagnit to'lqin uzunligiga ham bevosita bog'liqdir. Interferometrik fazani to'g'ri talqin qilish uchun qo'shni kuzatuvlar orasidagi qiya masofa bo'yicha yuzaga kelgan siljish qiymati, odatda, ishlatilayotgan to'lqin uzunligining yarmidan oshmasligi lozim. Ushbu shart bajarilganda fazaviy noaniqliklar kamayadi va yer yuzasi siljishlarini yuqori aniqlik bilan baholash imkoniyati yaratiladi. Yer yuzasi cho'kishlarini aniqlashning interferometrik prinsipi bir xil hududni turli vaqtlarda radiolokatsion suratga olish natijasida olingan signallarning fazaviy farqini tahlil qilishga asoslanadi (3-rasm). Interferogrammada hosil bo'lgan faza farqi yer yuzasida sodir bo'lgan

deformatsiyalar haqida miqdoriy axborot beradi.



3-rasm. Nuqtada vertikal siljishlarni ajratib ko'rsatish prinsipi.

Natijalar. Olib borilgan tadqiqotlar natijasida radar interferometriyasi (InSAR) texnologiyasi yer yuzasi deformatsiyalarini masofadan turib yuqori aniqlikda monitoring qilish imkoniyatiga ega bo'lgan eng samarali geofazoviy usullardan biri ekanligi ilmiy jihatdan asoslandi. Tadqiqot davomida SAR tizimlarining ishlash prinsipi, elektromagnit to'lqinlarning X-, C- va L-diapazonlari hamda ularning deformatsiyalarni aniqlash aniqligiga ta'siri kompleks ravishda tahlil qilindi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, C-diapazonli Sentinel-1 sun'iy yo'ldosh ma'lumotlari millimetr darajasidagi deformatsiyalarni aniqlash imkonini beradi va konchilik hududlarida geodinamik jarayonlarni kuzatish uchun eng maqbul manbalardan biri hisoblanadi.

Tahlillar natijasida elektromagnit to'lqin uzunligi ortishi bilan uning turli muhitlarga kirib borish qobiliyati ortishi, ammo fazoviy ajrata olish qobiliyati nisbatan kamayishi aniqlandi. Aksincha, X-diapazon yuqori fazoviy aniqlikni ta'minlasa-da, atmosfera va namlik ta'siriga sezgirligi yuqoriroq ekanligi kuzatildi. Shu sababli geodezik monitoring vazifalarida radar diapazonini tanlash tadqiqot obyekti tabiiy-geografik sharoiti hamda kuzatilayotgan deformatsiya xarakteridan kelib chiqib amalga oshirilishi lozim.

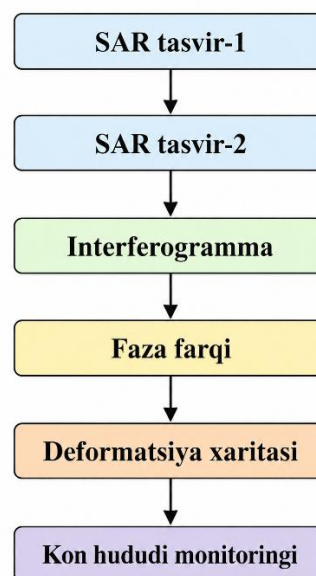
1-jadval

Radar diapazonlarining asosiy xususiyatlari va InSAR texnologiyasida qo'llash samaradorligi

Radar diapazoni	To'lqin uzunligi (sm)	Penetratsiya	Fazoviy aniqlik	InSAR uchun mosligi
X-band	2.4-3.8	Past	Juda yuqori	80%
C-band	3.8-7.5	O'rtacha	Yuqori	100%
L-band	15-30	Juda yuqori	O'rtacha	90%

Interferometrik tahlilning nazariy asoslari

shuni ko'rsatdiki, fazoviy noaniqliklarning oldini olish uchun kuzatilayotgan siljish miqdori qo'llanilayotgan elektromagnit to'lqin uzunligining yarmidan oshmasligi zarur. Mazkur shart bajarilganda interferogrammalarni dekodlash sifati oshadi hamda deformatsiyalarni yuqori aniqlik bilan aniqlash imkoniyati yaratiladi.



4-rasm. InSAR texnologiyasida deformatsiyalarni aniqlashning umumiy algoritmi.

Xulosa. O'tkazilgan tahlillar radar interferometriyasi (InSAR) texnologiyasi yer yuzasi deformatsiyalarini masofadan monitoring qilishning yuqori aniqlik va ishonchlilikka ega zamonaviy geofazoviy usullaridan biri ekanligini ko'rsatdi. Sintezlangan aperturali radar (SAR) ma'lumotlari asosida interferometrik tahlilni qo'llash yer yuzasidagi millimetr darajasidagi siljish va cho'kishlarni aniqlash, ularning fazoviy-vaqt bo'yicha rivojlanish dinamikasini baholash imkonini beradi.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, radar diapazonini tanlash kuzatuv obyekti xususiyati, tabiiy-geografik sharoit va talab etiladigan aniqlik darajasiga bevosita bog'liq. X-, C- va L-diapazonlari turli geologik hamda geodinamik sharoitlarda o'ziga xos afzalliklarga ega bo'lib, ayniqsa C-diapazonli SAR ma'lumotlari yer yuzasi deformatsiyalarini monitoring qilishda yuqori samaradorlikni ta'minlaydi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications. John Wiley & Sons.
- [2] Dhont, D., Chorowicz, J., & Cadet, J. (2003). Detection of compression structures from SAR ERS imagery: Examples of the central Japan seismic area. International Journal of Remote Sensing, 24, 559–571.
- [3] Botirov, S. S., Nomdorov, R. U., & Abdisamatov, B. A. (2026). Sentinel-1 tasvirlari yordamida yer osti konchilik faoliyati natijasida yuzaga kelgan yer yuzasi deformatsiyasini insar usuli orqali monitoring qilish. Sanoatda Raqamli Texnologiyalar, 4(1), 69-74. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.1.2026.22>
- [4] Боти́ров, Ш. С., & Номдоров, Р. У. (2025). Мониторинг деформаций земной поверхности, вызванных подземными горными работами на месторождении хондиза, на основе технологии insar и спутниковых изображений SENTINEL-1. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 3(3), 88-93. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.3.3.2025.30>
- [5] Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. Institution of Mining and Metallurgy.
- [6] Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., & Wiesmann, A. (2003). Deformatsiyani xaritalash uchun interferometrik nuqtaviy nishonlar tahlili. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 7, 4362–4364.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Botirov, S. S. o'g'li, & Nomdorov, R. U. (2026). Radar interferometriyasi (InSAR) texnologiyasining nazariy asoslari va yer yuzasi deformatsiyalarini monitoring qilish imkoniyatlari. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.20>

UO‘K: 620.169.1

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.21

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

KARYER EKSKAUTORI CHO‘MICH TISHLARINING DINAMIK YUKLANISH SHAROITIDA ABRAZIV YEMIRILISHINI BAHOLASH



**Djurayev Rustam
Umarxanovich**

Navoiy davlat konchilik va
texnologiyalar universiteti, Texnika
fanlari doktori, Professor, Navoiy,
O‘zbekiston
E-mail: r.u.djuraev@yandex.ru
ORCID ID: 0000-0003-2712-3003



**Turdiyev Sardorjon
Abdumuminovich**

Navoiy davlat konchilik va
texnologiyalar universiteti, dotsent,
Navoiy, O‘zbekiston
Email: 3167229@gmail.com
ORCID ID: 0009-0004-0054-3424



**Abdurakhmonov Otabek
Usmon o‘g‘li**

Islom Karimov nomidagi Toshkent
Davlat texnika universiteti PhD
doctoranti, Toshkent, O‘zbekiston
E-mail:
abduraxmonovo270@gmail.com
ORCID ID: 0009-0009-7578-4093



**Jurayev Akbar
Shavkatovich**

Navoiy davlat konchilik va
texnologiyalar universiteti, dotsent,
Navoiy, O‘zbekiston
E-mail:
jurayevakbar1987@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-9154-6698

Annotatsiya. Maqolada karyer ekskavatori cho‘mich tishlarining dinamik yuklanish sharoitida abraziv yemirilish jarayoni tadqiq etilgan. Qazish jarayonida cho‘mich tishlariga ta’sir etuvchi kontakt bosimi, ishqalanish kuchlari, abraziv zarrachalar va dinamik yuklamalarning yemirilish intensivligiga ta’siri tahlil qilingan. Tish profili bo‘ylab ajratilgan xarakterli uchastkalarda yemirilish miqdorining notekis taqsimlanishi aniqlanib, eng yuqori yemirilish kesuvchi qirra va unga yaqin kontakt zonalarida yuzaga kelishi asoslangan. Eksperimental natijalar asosida yemirilish jarayonining tish uzunligi bo‘ylab o‘zgarishini ifodalovchi ikkinchi darajali regressiya modeli ishlab chiqilgan. Modelning statistik ko‘rsatkichlari uning tajriba natijalariga yetarli darajada mos kelishini ko‘rsatgan. Olingan natijalar cho‘mich tishlarining eng ko‘p yemiriladigan qismlarini aniqlash, ularni lokal mustahkamlash, himoya qoplamalaridan foydalanish, xizmat muddatini prognozlash hamda ekskavator ishchi organlarining ekspluatatsion ishonchliligini oshirish uchun amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so‘zlar: karyer ekskavatori, cho‘mich tishi, abraziv yemirilish, dinamik yuklanish, kesuvchi qirra, yemirilish intensivligi, tog‘ jinsi abrazivligi, regressiya modeli, xizmat muddati.

Received: 21.07.2026

Accepted: 01.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ОЦЕНКА АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ЗУБЬЕВ КОВША КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

**Джуряев Рустам
Умарханович**

Навоийский государственный
университет горного дела и
технологий, Доктор технических
наук, профессор, Навои,
Узбекистан

**Турдыев Сардоржон
Абдумунинович**

Навоийский государственный
университет горного дела и
технологий, доцент, Навои,
Узбекистан

**Абдурахмонов Отабек
Усмон угли**

Докторант PhD Ташкентского
государственного технического
университета имени Ислама
Каримова, Ташкент, Узбекистан

**Жураев Акбар
Шавкатович**

Навоийский государственный
университет горного дела и
технологий, доцент, Навои,
Узбекистан

Аннотация. В статье исследован процесс абразивного износа зубьев ковша карьерного экскаватора в условиях динамического нагружения. Проанализировано влияние контактного давления, сил трения, абразивных частиц и динамических нагрузок, возникающих в процессе экскавации, на интенсивность изнашивания зубьев. Установлено неравномерное распределение

величины износа по характерным участкам профиля зуба и обосновано, что максимальный износ формируется в области режущей кромки и прилегающей к ней контактной зоны. На основе экспериментальных данных разработана регрессионная модель второго порядка, описывающая изменение величины износа по длине зуба. Статистические показатели модели подтверждают её достаточное соответствие результатам экспериментальных исследований. Полученные результаты имеют практическое значение для определения наиболее интенсивно изнашиваемых участков зубьев ковша, их локального упрочнения, применения защитных покрытий, прогнозирования срока службы и повышения эксплуатационной надёжности рабочих органов карьерных экскаваторов.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, зуб ковша, абразивный износ, динамическая нагрузка, режущая кромка, интенсивность износа, абразивность горных пород, регрессионная модель, срок службы.

ASSESSMENT OF ABRASIVE WEAR OF OPEN-PIT EXCAVATOR BUCKET TEETH UNDER DYNAMIC LOADING CONDITIONS

**Djurayev Rustam
Umarxanovich**

Navoi State University of Mining
and Technologies, Doctor of
Technical Sciences, Professor,
Navoi, Uzbekistan

**Turdiyev Sardorjon
Abdumuminovich**

Navoi State University of Mining
and Technologies, Associate
Professor, Navoi, Uzbekistan

**Abdurakhmonov Otabek
Usmon ugli**

PhD doctoral student at Islam
Karimov Tashkent State Technical
University, Tashkent, Uzbekistan

**Zhuraev Akbar
Shavkatovich**

Navoi State University of Mining
and Technologies, Associate
Professor, Navoi, Uzbekistan

Abstract. This article investigates the abrasive wear of open-pit excavator bucket teeth under dynamic loading conditions. The effects of contact pressure, friction forces, abrasive particles, and dynamic loads arising during excavation on the wear intensity of bucket teeth are analyzed. The study reveals a non-uniform distribution of wear along characteristic sections of the tooth profile and demonstrates that the highest wear occurs at the cutting edge and in the adjacent contact zone. Based on the experimental data, a second-order regression model describing the variation in wear along the tooth length is developed. The statistical parameters of the model indicate satisfactory agreement with the experimental results. The findings are of practical importance for identifying the most intensively worn areas of bucket teeth, applying localized strengthening and protective coatings, predicting service life, and improving the operational reliability of open-pit excavator working elements.

Keywords: open-pit excavator, bucket tooth, abrasive wear, dynamic loading, cutting edge, wear intensity, rock abrasiveness, regression model, service life.

Kirish. Ochiq usulda foydali qazilmalarni qazib olish jarayonlarida karyer gidravlik ekskavatorlari asosiy texnologik uskunalardan biri hisoblanadi. Ushbu mashinalar kon ishlarida tog' jinslarini massivdan ajratib olish, qazish, cho'michga to'ldirish va transport vositalariga ortish kabi muhim texnologik operatsiyalarni bajaradi. Karyer ekskavatorlarining ish unumdorligi va ekspluatatsion samaradorligi, birinchi navbatda, ularning ishchi a'zolari konstruksiyasi va ishonchlilikiga bog'liq. Shu sababli cho'mich tishlari va kesuvchi elementlarning ishlash sharoiti, yemirilish mexanizmi va xizmat muddatini o'rganish konchilik sanoatida muhim ilmiy-amaliy

vazifalardan biri hisoblanadi. Karyer ekskavatorlari ekspluatatsiya jarayonida og'ir sharoitlarda ishlaydi. Qazish vaqtida cho'mich tishlari tog' jinslari bilan bevosita kontaktda bo'lib, yuqori dinamik va statik yuklamalar ta'sirida bo'ladi. Bu holat kesuvchi elementlarning intensiv abraziv yemirilishiga olib keladi. Manbada keltirilgan ma'lumotlarga ko'ra, kon mashinalaridagi harakatlanuvchi qismlarning 80–90 % gacha bo'lgan nosozliklari yemirilish jarayonlari bilan bog'liq. Natijada mashinaning ishonchlilikiga pasayadi, ekspluatatsiya xarajatlari ortib boradi va texnologik jarayonlarning samaradorligi kamayadi [1-4].

Karyer ekskavatorlari cho'mich tishlarining

yemirilishi, ayniqsa, tog' jinslarining fizik-mexanik xususiyatlari tez o'zgarib turadigan sharoitlarda yanada kuchayadi. Tog' jinslarining qattiqligi, abrazivligi va granulometrik tarkibi kesish jarayonidagi yuklamalarga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Tishlar ruxsat etilgan yemirilish darajasiga etganda kesish jarayonidagi yuklama 40–50% gacha ortishi, ekskavator ish unumdorligining 40% gacha kamayishi va yonilg'i sarfining 30% gacha ortishi mumkin. Bunday holatlar kon uskunalari ekspluatatsiya qilishda iqtisodiy samaradorlikning pasayishiga sabab bo'ladi [5,6].

Qazish jarayonida cho'mich tishlarining yemirilishi bir nechta omillar ta'sirida sodir bo'ladi. Ularga tog' jinslarining abrazivligi va qattiqligi, kesish jarayonidagi solishtirma yuklama, ishqalanish sharoitlari, dinamik zarb yuklamalari hamda materialning mexanik va tribologik xususiyatlari kiradi. Mazkur omillar ta'sirida cho'mich tishlarida asosan abraziv yemirilish kuzatiladi. Abraziv yemirilish jarayonida qattiq zarrachalar metall sirtiga botib kirib, uni mikroqirqish va plastik deformasiya mexanizmlari orqali yemirib boradi [7].

Mavjud tadqiqotlarni tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, kesuvchi elementlarning yemirilishini baholashga qaratilgan ko'plab modellar ayrim omillarnigina hisobga oladi. Ayniqsa, karyer ekskavatorlari ishchi a'zolari uchun xos bo'lgan dinamik yuklamalar ta'siri ko'p hollarda etarlicha inobatga olinmagan. Shuningdek, mavjud modellarda kesuvchi element geometriyasining vaqt davomida o'zgarishi va yemirilish jarayonining bosqichma-bosqich rivojlanishi to'liq aks ettirilmagan.

Shu nuqtai nazardan, karyer ekskavatori cho'mich tishlarining dinamik yuklanish sharoitida abraziv yemirilishini baholash, tish profili bo'ylab yemirilish intensivligining taqsimlanishini tahlil qilish va kesuvchi elementlarning ekspluatatsion samaradorligini oshirishga qaratilgan amaliy xulosalarni asoslash dolzarb hisoblanadi. Mazkur tadqiqotning maqsadi karyer ekskavatori cho'mich tishlarining dinamik yuklanish sharoitida abraziv yemirilish jarayonini baholash va yemirilishning tish profili bo'ylab taqsimlanish xususiyatlarini aniqlashdan iborat [8,9].

Adabiyotlar tahlili. Abraziv yemirilish jarayonlarini nazariy jihatdan o'rganish tribologiya

sohasida olib borilgan fundamental tadqiqotlarga asoslanadi. Ushbu sohadagi ilmiy ishlar asosan kontakt mexanikasi, abraziv zarrachalarning metall sirtiga ta'siri, materialning mexanik xususiyatlari va ishqalanish jarayonida yuza qatlamida sodir bo'ladigan o'zgarishlarni tahlil qilishga qaratilgan. Cho'mich tishlari kabi kesuvchi elementlar uchun abraziv yemirilish jarayonini baholashda tog' jinsi zarrachalarining sirtga ta'siri, ishchi yuzadagi yuklama va ishqalanish yo'li muhim ahamiyatga ega [10].

Abraziv yemirilish jarayonlarini matematik ifodalash bo'yicha ilk fundamental modellardan biri J.F. Archard tomonidan taklif etilgan. Archard modeli ishqalanish jarayonida material yo'qolishini normal yuklama, ishqalanish yo'li va material qattiqligiga bog'liq holda baholaydi. Ushbu model tribologiya sohasida keng qo'llanilsa-da, abraziv zarrachalar ta'sirida yuzaga keladigan mikroqirqish va plastik deformasiya jarayonlarini to'liq hisobga olmaydi. Shu sababli uni karyer ekskavatori cho'mich tishlarining real ekspluatatsiya sharoitidagi yemirilishini baholashda qo'shimcha omillar bilan to'ldirish zarurati mavjud [11].

Kontakt mexanikasi asosida yemirilish jarayonlarini tadqiq qilishda I.V. Kragelskiy tomonidan ishlab chiqilgan nazariya muhim ahamiyatga ega. Ushbu nazariyada kontakt yuzalarning haqiqiy maydoni, mikronotekisliklar geometriyasi va deformasiya sikli kabi omillar hisobga olinadi. Kragelskiy tadqiqotlarida ishqalanish jarayonida yuzalarning mikronotekisliklari o'zaro ta'sirga kirishib, materialning plastik deformatsiyasi va mikroqirqilishiga olib kelishi ko'rsatib berilgan. Bu yondashuv abraziv muhitda ishlaydigan kesuvchi elementlar sirtida yuzaga keladigan mexanik ta'sirlarni tushuntirishda muhim hisoblanadi [12].

Abraziv yemirilish mexanizmini mikro-mexanik nuqtai nazardan o'rganishda T. Malxern va L.Samuels tomonidan olib borilgan tadqiqotlar alohida ahamiyatga ega. Ushbu tadqiqotlarda abraziv zarrachalarning metall sirtiga botish chuqurligi va ularning geometrik parametrlari yemirilish intensivligiga katta ta'sir ko'rsatishi aniqlangan. Mualliflar abraziv yemirilish jarayonida asosiy mexanizmlar sifatida mikroqirqish, yuza plastik deformatsiyasi va mikrosiqilish jarayonlarini ko'rsatib o'tganlar [13].

Konchilik mashinalari ishchi organlarining yemirilish jarayonlarini tadqiq qilishda A.K. Reysh tomonidan taklif etilgan empirik model ham muhim o‘rin tutadi. Ushbu yondashuvda yemirilish miqdori tog‘ jinsining abrazivligi, kontakt yuzasidagi yuklama va materialning mexanik xususiyatlariga bog‘liq deb qabul qilinadi. Bu model kon mashinalari ishchi elementlari uchun amaliy ahamiyatga ega bo‘lsa-da, kesish jarayonidagi dinamik yuklamalar ta‘siri etarli darajada hisobga olinmagan [14].

Abraziv muhitda ishlaydigan kesuvchi elementlarning yemirilishini o‘rganishda U.A. Ikromov va M.A. Levintin tomonidan taklif etilgan modellar ham muhim ahamiyatga ega. Ushbu tadqiqotlarda abraziv zarrachalarning metall sirtiga botishi va ularning kontakt yuzasidagi harakati asosida materialning yemirilish mexanizmi tahlil qilingan. Mualliflar abraziv zarrachalarning o‘lchami va kontakt bosimi yemirilish intensivligiga asosiy ta‘sir etuvchi omillardan biri ekanligini ko‘rsatganlar [13].

Mavjud hisoblash usullarining tahlili shuni ko‘rsatadiki, kesuvchi elementlarning yemirilishini baholashga qaratilgan modellar to‘liq emas hamda ularning ayrimlari hisoblash nuqtai nazaridan ancha murakkab hisoblanadi. Bunday modellarni qo‘llash uchun ishqalanish yuzalarining mikrogeometriya parametrlari, materialning mexanik va charchoq xususiyatlari haqida aniq ma‘lumotlar talab etiladi. Shu bilan birga, karyer sharoitida ishchi organlarga ta‘sir qiluvchi yuklamalar o‘zgaruvchan va dinamik xarakterga ega bo‘lganligi sababli, yemirilish jarayonini baholashda faqat bitta omilga tayangan modellar haqiqiy jarayondan sezilarli og‘ishlarga olib kelishi mumkin [15,16].

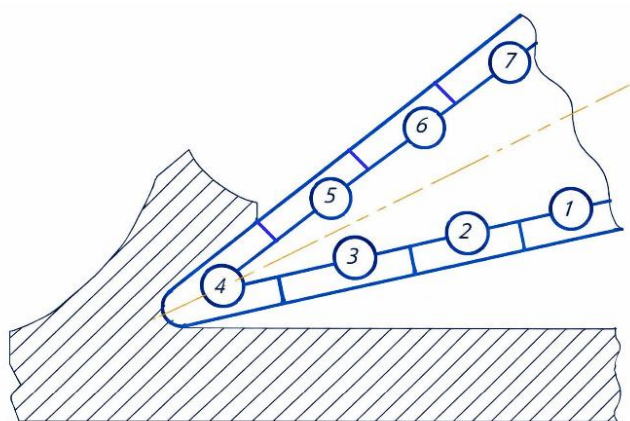
Karyer ekskavatorlari cho‘michi kesuvchi elementlarining yemirilish miqdorini hisoblash usullarini tahlil qilish natijasida ushbu jarayonga ta‘sir etuvchi bir qator asosiy parametrlar aniqlanadi. Ularga kesuvchi elementdagi solishtirma yuklama, abraziv zarrachalarning sirtga botish chuqurligi, yemirilish yo‘li uzunligi, tog‘ jinslarining abrazivlik koeffitsienti, yemirilishga chidamlilik koeffitsienti, kontakt yuzasi o‘lchami, nominal siljish yuzasi va eyilgan material hajmi kiradi. Ushbu parametrlar cho‘mich tishlarining yemirilish jarayonini matematik jihatdan baholashda muhim ahamiyatga ega [5,17].

Metodologiya. Ishchi a‘zolarining ish jarayonidagi dinamik darajasining ularning abraziv yemirilishiga ta‘sirini baholash bir cho‘michli karyer ekskavatorlari cho‘michining tishlari misolida ko‘rib chiqildi. Chunki konchilik sanoatida hozirgi kunda qazish-yuklash ishlarida asosan bir cho‘michli karyer ekskavatorlari keng qo‘llaniladi. Ushbu mashinalarning tog‘ jinsi bilan bevosita aloqada bo‘ladigan qismlari, ayniqsa cho‘mich tishlari, abraziv muhitda intensiv ishqalanish va zarbli yuklamalar ta‘sirida ishlaydi.

Ekskavator ishchi a‘zolarining abraziv yemirilish xarakterini aniqlash shuni ko‘rsatadiki, mashinaning ishlashi paytida tog‘ jinsi bilan bevosita aloqada bo‘lgan qismlarida yemirilish tezligi bir xil emas. Manbada keltirilgan ma‘lumotlarga ko‘ra, tog‘ jinslarini qazish-yuklash ishlarida ishlaydigan ekskavator cho‘mich tishlari kesuvchi qismlarining yemirilish darajasi 1,0 ga teng deb qabul qilinganda, ularning yon qirralari 4–5 marta yuqori yemirilish darajasiga ega bo‘ladi, tishlar bilan himoyalangan old yuzalarining so‘nggi qirralari esa 15–50 marta kamroq yemiriladi. Bu holat cho‘mich tishlarida yemirilishning notekis taqsimlanishini ko‘rsatadi [18].

Abrazivlanuvchi qismga zarb bilan urilgan vaqtda yuzaga keladigan dinamik yuklamalar ta‘sirida abraziv yemirilish jarayonini baholashdagi asosiy qiyinchilik haqiqiy kontakt yuzasini aniqlashning murakkabligi bilan bog‘liq. Shu bilan birga, abraziv yemirilishning har bir barqaror holat jarayoni uchun haqiqiy solishtirma yuklamalar ma‘lum chegaralarda doimiy bo‘lishi mumkin. Biroq solishtirma yuklamalarni raqamli aniqlash amaliy jihatdan murakkab bo‘lganligi sababli, ularning ta‘siri cho‘mich tishi materialining ishlash jarayonidagi holati va yemirilish xususiyati orqali baholanadi [5].

Cho‘mich tishi yuzasi bo‘ylab yemirilish intensivligini tahlil qilish maqsadida tish uzunligi bo‘yicha 1–7 ta xarakterli uchastka ajratildi. 1–3 uchastkalar tishning pastki kontakt yuzasiga to‘g‘ri kelib, qazish jarayonida tog‘ jinsi bilan ishqalanish ta‘sirida bo‘ladi. 4-uchastka kesuvchi qirra qismi bo‘lib, bu erda kontakt bosimi va abraziv ta‘sir eng yuqori darajada shakllanadi. 5–7 uchastkalar tishning yuqori qismida joylashgan bo‘lib, tog‘ jinsi bilan ikkillamchi sirpanish kontakti yuzaga keladi.



1-rasm. Ekskavator cho'michi tishining tog' jinsi bilan o'zaro ta'sirida tajriba-sinov uchastkalari sxemasi.

Metodologik jihatdan tadqiqot cho'mich tishida abraziv yemirilishning tish profili bo'ylab qanday taqsimlanishini baholashga 1-rasmda ko'rsatilgan. Buning uchun tishning turli uchastkalaridagi yemirilish miqdori solishtirildi va kesuvchi qirraga yaqin zonalarida yemirilishning yuqori darajada shakllanishi asosiy baholash mezon sifatida qaraldi. Ushbu yondashuv cho'mich tishlari qaysi zonalarida ko'proq yemirilishga uchrashini aniqlash va keyingi ekspluatasion choralarni belgilash imkonini beradi.

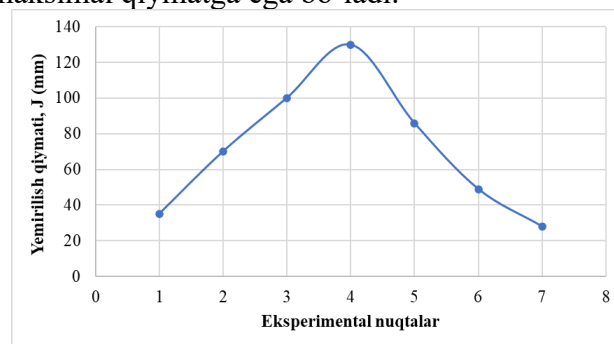
Muhokama va natijalar. Tadqiqot natijalari cho'mich tishi uzunligi bo'ylab abraziv yemirilish intensivligi bir xil taqsimlanmasligini ko'rsatadi. yemirilish jarayoni, asosan, tishning tog' jinsi bilan bevosita va eng yuqori kontakt bosimida ishlaydigan qismlarida kuchliroq namoyon bo'ladi. Bu holat karyer ekskavatori cho'mich tishlari ish jarayonida turli uchastkalarda turlicha yuklanishga duch kelishini tasdiqlaydi.

Cho'mich tishi uzunligi bo'ylab ajratilgan 1–7 ta uchastkalarda yemirilish miqdorining o'zgarishi tahlil qilinganda, tishning boshlang'ich qismida, ya'ni 1–2 uchastkalarda yemirilish miqdori nisbatan kichik ekanligi aniqlanadi. Manbada keltirilgan natijalarga ko'ra, ushbu uchastkalarda yemirilish miqdori taxminan 35–70 mm atrofida bo'ladi. Bu zonada tog' jinsi bilan kontakt yuklamalari nisbatan past bo'lib, abraziv ta'sir ham kamroq namoyon bo'ladi.

Tishning o'rta qismiga yaqinlashgan sari yemirilish intensivligi keskin ortib boradi. 3–4 uchastkalarda yemirilishning maksimal qiymati

kuzatilib, u taxminan 100–130 mm ga etadi. Bu holat mazkur zonada tog' jinsi bilan kontakt bosimi, ishqalanish kuchlari va abraziv ta'sirning eng yuqori bo'lishi bilan izohlanadi. Ayniqsa, 4-uchastka kesuvchi qirraga yaqin zona bo'lganligi sababli, unda abraziv zarrachalarning ta'siri va material sirtining intensiv yemirilishi kuchli namoyon bo'ladi.

Tishning keyingi qismida, ya'ni 5–7 uchastkalarda yemirilish miqdori qayta kamayish tendensiyasiga ega. Bu holat ushbu sohalarida kontakt yuklamalarining pasayishi va abraziv ta'sir intensivligining kamayishi bilan bog'liq. Demak, cho'mich tishida abraziv yemirilish asosan kesuvchi qirra va unga yaqin bo'lgan kontakt zonasida maksimal qiymatga ega bo'ladi.



2-rasm. Cho'mich tishining eksperimental nuqtalaridagi yemirilish miqdorlarining o'zgarishi.

Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, karyer ekskavatorlari cho'mich tishlarida yemirilishning eng yuqori intensivligi kesuvchi qirra va unga yaqin kontakt zonasida kuzatiladi va 2-rasmda grafik ko'rinishda o'z ifodasini topganligini ko'rishimiz mumkin. Bu esa mazkur zonada konstruksiyani mustahkamlash, qotishmalardan foydalanish yoki qoplama materiallar qo'llash zarurligini ko'rsatadi. Bunday yondashuv cho'mich tishlarining xizmat muddatini uzaytirish va ishchi organlarning ekspluatasion ishonchliligini oshirishda muhim amaliy ahamiyatga ega.

Cho'mich tishlarining yemirilish miqdorini matematik jihatdan baholashda tish uzunligi bo'ylab yemirilishning avval ortib, keyin kamayishi hisobga olindi. Manbada keltirilgan natijalarga ko'ra, yemirilish taqsimoti parabolik qonuniyatga yaqin bo'lib, uni ikkinchi darajali model orqali ifodalash mumkin.

Yemirilish taqsimotining umumiy ko'rinishi

quyidagicha qabul qilinadi:

$$J(x) = \alpha + \beta x - \gamma x^2 \quad (1)$$

bu erda: $J(x)$ — tish uzunligi bo'ylab yemirilish miqdori, mm;

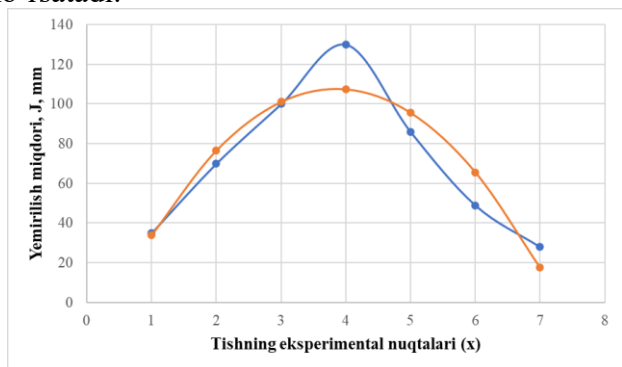
x — tish bo'ylab tajriba uchastkasining tartib raqami;

α, β, γ — regression koeffisientlar.

Eksperimental ma'lumotlar asosida yemirilish miqdori quyidagi ifoda orqali berilgan:

$$J(x) = -26.86 + 69.92x - 9.08x^2 \quad (2)$$

3-rasmda ushbu regressiya tenglama va cho'mich tishi profili bo'ylab yemirilish miqdorining 3–4 uchastkalarda maksimal qiymatga etib, keyingi uchastkalarda pasayishini ifodalaydi. Mazkur model uchun determinasiya koeffisienti $R^2=0.873$ bo'lib, dispersion tahlil natijasida $F_{hisob}=13.81 > F_{jadval}=6.94$ ekanligi aniqlangan. Bu holat yemirilish taqsimotini ifodalovchi model eksperimental ma'lumotlar bilan mos kelishini ko'rsatadi.



3-rasm. Regressiya tenglamasi va eksperimental tadqiqotlar natijalari asosida tishning turli nuqtalaridagi yemirilish miqdorlari.

Tahlillar shuni ko'rsatadiki, cho'mich tishlarining yemirilish jarayoni faqat umumiy ishqalanish ta'siri bilan emas, balki tish profili bo'ylab yuklamalarning notekis taqsimlanishi bilan ham bog'liq. Shu sababli tishning kesuvchi qirraga yaqin qismi ish jarayonida eng og'ir ekspluatatsion sharoitda bo'ladi. Bu zonada abraziv zarrachalar ta'siri, kontakt bosimi va dinamik yuklamalar

birgalikda ta'sir qilib, materialning intensiv yemirilishiga olib keladi.

Xulosa. Karyer ekskavatori cho'mich tishlarining dinamik yuklanish sharoitida abraziv yemirilishi tahlil qilinganda, tish profili bo'ylab yemirilish miqdori bir xil taqsimlanmasligi aniqlandi. yemirilish jarayoni cho'mich tishining tog' jinsi bilan bevosita kontaktda bo'ladigan qismlarida, ayniqsa kesuvchi qirra va unga yaqin zonada yuqori darajada namoyon bo'ladi.

Tadqiqot natijalariga ko'ra, 1–2 uchastkalarda yemirilish miqdori nisbatan past bo'lib, taxminan 35–70 mm atrofida qayd etildi. 3–4 uchastkalarda esa yemirilish intensivligi keskin ortib, 100–130 mm gacha etishi aniqlandi. Bu holat mazkur zonalarida kontakt bosimi, ishqalanish kuchlari va abraziv ta'sirning yuqori darajada shakllanishi bilan izohlanadi. 5–7 uchastkalarda yemirilish miqdorining qayta kamayishi ushbu sohalarida kontakt yuklamalari nisbatan pasayishi bilan bog'liq.

Yemirilish taqsimotini matematik ifodalash uchun ikkinchi darajali model qo'llanildi. eksperimental ma'lumotlar asosida

$$J(x) = -26.86 + 69.92x - 9.08x^2 \quad (3)$$

ko'rinishidagi tenglama berildi. Ushbu model cho'mich tishi uzunligi bo'ylab yemirilish miqdorining avval ortib, keyin kamayishini ifodalaydi. Model uchun $R^2=0.873$ va $F_{hisob}=13.81 > F_{jadval}=6.94$ natijalari uning eksperimental ma'lumotlarga mosligini ko'rsatadi.

Olingan natijalar cho'mich tishlarining eng tez yemiriladigan uchastkalarini aniqlash, ularni lokal mustahkamlash, qoplama materiallardan foydalanish va texnik xizmat ko'rsatish interval-larini asoslash imkonini beradi. Shuningdek, yemirilish taqsimotini baholash karyer ekskavatorlari ishchi organlarining xizmat muddatini uzaytirish va ekspluatatsion samaradorligini oshirishda amaliy ahamiyatga ega.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Djabborov, M. N., & Aripov, L. T. (2013). Foydali qazilmalarni ochiq usulda qazib olish. Iqtisod-Moliya. 88 b.
- [2] Sagatov, N. H. (2015). Ochiq kon ishlari texnologiyasi va kompleks mexanizatsiyalash. Kamalak Press. 296 b.

- [3] Болобов, В. И., Баталов, А. П., Бочков, В. С., & Чупин, С. А. (2014). Износостойкость стали 110Г13Л в различных абразивных средах. Записки Горного института, 209, 17–22.
- [4] Chorshanbiev, S. M., Karimov, K. A., Adilova, S. R., Turakhodjaev, N. J., Erkinjonov, A., Mirmuhamedov, M. M., Sharipov, J. H., Obidove, Z. R., & Komolov, K. (2024). Development of wear-resistant parts of high-manganese modified 110G13L brand steel. Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 17(2), 175–185.
- [5] Турдиев, С. А., & Жураев, А. Ш. (2022). Исследование влияния абразивного изнашивания зуба ковша экскаватора на величину сопротивления копания грунта. Academic Research in Educational Sciences, 3(3), 105–110.
- [6] Sultanov, D., & Mamahonov, A. (2026). Tog' jinslari mustahkamligini o'lchash usullarining tahlili. Строительство и образование, 5(1), 15–23.
- [7] Umidjon, K. Y. T. N. H., et al. (2024). Tog' jinslari va ularning tarkibiy qismi, ularning sanoatda ishlatilishi. Zamonaviy ta'limda fan va innovatsion tadqiqotlar jurnali, 2(7), 64–73.
- [8] Ubaydullaev, M., Ruklinskaya, E., Kosimov, U., & Khalikulov, U. (2025). Technology of surface hardening of teeth of excavator buckets by composite carburizing method. Vibroengineering Procedia, 60, 353–358. <https://doi.org/10.21595/vp.2025.25501>
- [9] Полюшкин, Н. Г. (2013). Основы теории трения, износа и смазки: Учебное пособие. Красноярск. 192 с.
- [10] Михальченко, А. М., и др. (2017). К вопросу о форме частиц кварцевой фракции почвы и их влиянии на изнашивание деталей рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Труды ГОСНИТИ, 129, 142–147.
- [11] Колпаков, В. И., & Илюхина, А. А. (2019). Особенности математического моделирования разрушения конструкций из разных материалов под действием высокоскоростной гидроабразивной струи. Инженерный журнал: наука и инновации, (9/93), 1.
- [12] Тихомиров, В. П., & Измеров, М. А. (2015). Контактная механика фрактальных поверхностей. Транспортное машиностроение, (1/45), 60–66.
- [13] Попов, С. Н., & Андриенко, С. В. (2013). Исследование характера изнашивания и анализ механизма абразивного разрушения рабочих органов баровых машин. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, (1), 50–56.
- [14] Гречнева, М. В., Толкачев, С. А., & Владимирцев, И. К. (2011). Повышение износостойкости деталей горных машин. iPolytech Journal, (12/59), 26–29.
- [15] Пасько, Н. И., Анцев, А. В., Анцева, Н. В., & Сальников, С. В. (2015). Веерная модель износа режущего инструмента и оптимизация режима профилактики. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, (12-1), 119–130.
- [16] Исследование параметров износа состояния режущего инструмента. (2022). Uzbek Scholar Journal, 9, 47–49. Maqola sahifasi
- [17] Haydarov, Sh. B., & Usmonov, M. Z. (2023). Ekskavator ishchi a'zolarining ish samaradorligini oshirishda ta'sir etuvchi omillarni tahlil qilish. Sanoatda raqamli texnologiyalar / Цифровые технологии в промышленности, 1(2), 70–78. DOI: 10.5281/zenodo.10392643
- [18] Turdiyev, S. A., et al. (2022). Experimental and test study of the effectiveness of the improved design of the excavator bucket jaw plate. Central Asian Research Journal for Interdisciplinary Studies (CARJIS), 2(3), 214–223.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Abdurakhmonov, O. U., Djuraev, R. U., Jurayev, A. S., & Turdiyev, S. A. (2026). Karyer ekskavatori cho'mich tishlarining dinamik yuklanish sharoitida abraziv yemirilishini baholash. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.21>

UO‘K: 622.7:622.342.1

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.24

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

MIS-PORFIR MA'DANIDAN OLTIN VA KUMUSHNI MARKAZDAN QOCHMA KONSENTRATOR YORDAMIDA AJRATIB OLIISHDA G-OMIL VA SIKL VAQTI TA'SIRINI FAKTORLI TAJRIBA ASOSIDA BAHOLASH



**Larionov Sergey
Vladimirovich**

“Olmaliq kon-metallurgiya” AJ
boshqaruv raisi o‘rinbosari, bosh
muhandis v.b., Olmaliq,
O‘zbekiston
E-mail: s.larionov@agmk.uz
ORCID ID: 0009-0007-0681-6552
Science ID: BTV-0738-0114



**Ergashev Mahmud
Axbaraliyevich**

Olmaliq davlat texnika instituti
tayanch doktoranti, Olmaliq,
O‘zbekiston
E-mail: mahmude423@gmail.com
ORCID ID: 0009-0009-3067-0412
Science ID: MTV-0425-0012



**Sidiqov Ravshan
Mirzabekovich**

“Olmaliq kon-metallurgiya” AJ 1-
mis boyitish fabrikasi direktori,
Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: r.sidikov@agmk.uz
ORCID ID: 0009-0010-4251-8187
Science ID: BTV-0852-0008



**Axmadaliyev Alisher
Madaminovich**

“Olmaliq kon-metallurgiya” AJ 1-
mis boyitish fabrikasi bosh
muhandisi, Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: a.ahmadaliyev@agmk.uz
ORCID ID: 0009-0009-4358-8144
Science ID: BTV-0521-0020

Annotatsiya. Ishda mis-porfir ma'danidan oltin va kumushni markazdan qochma konsentratorida ajratib olish jarayonining rejim omillari o'rganildi. Ma'dan kambag'al, undagi oltin miqdori 0,38 g/t; metallning asosiy massasi (69,12%) 2–8 mkm o'lchamdagi zarralarga to'g'ri keladi. Tajribalar «Knelson» KC-MD3 laboratoriya apparatida, ma'dan 80% –0,074 mm gacha maydalangan holatda bajarildi. Markazdan qochma kuch (G) 30 dan 150×g gacha, sikl vaqti (t) 10 dan 50 min gacha o'zgartirildi. Bir omilli tajribalar ajralib chiqishning G bo'yicha aniq maksimumga ega ekanini (54,0%, $G \approx 90 \times g$), sikl vaqti bo'yicha esa ≈ 30 min dan keyin platoga chiqishini ko'rsatdi. O'lcham sinflari kesimidagi tahlil kuchning yirik (+74 mkm) zarralarga deyarli ta'sir qilmasligini, 2–8 mkm sinfda esa ajralib chiqish 28% dan 38% gacha o'zgarishini aniqladi. Markaziy nuqtasi uch marta takrorlangan 2^o to'liq faktorli tajriba va dispersion tahlil G ning chiziqli effekti +3,25%, sikl vaqtiniki +2,75%, o'zaro ta'sir –1,25%, egrilik esa +5,18% ($p < 0,001$) ekanini ko'rsatdi. Bu javob sirtining noxiziqli ekanini va optimumning tajriba sohasi ichida ($\approx 90 \times g$; ≈ 30 min) joylashganini isbotlaydi. Kumush bo'yicha ko'rsatkichlar ham qayd etildi: uning ajralib chiqishi oltinnikiga o'xshash qonuniyatga bo'ysunib, maqbul rejimda 25,0% ni, boyitmadagi kumush tarkibi esa 108 g/t ni tashkil etadi.

Kalit so'zlar: mis-porfir ma'dan, G-omil, sikl vaqti, oltin va kumush ajralib chiqishi, to'liq faktorli tajriba, dispersion tahlil, javob sirti, egrilik effekti, jarayonni matematik modellashirish.

Received: 19.07.2026

Accepted: 06.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ G-ФАКТОРА И ВРЕМЕНИ ЦИКЛА ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ЗОЛОТА И СЕРЕБРА ИЗ МЕДНО-ПОРФИРОВОЙ РУДЫ С ПОМОЩЬЮ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОНЦЕНТРАТОРА НА ОСНОВЕ ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

**Ларионов Сергей
Владимирович**

Заместитель председателя
правления АО «Алмалыкский
горно-металлургический
комбинат», исполняющий
обязанности главного инженера,
Алмалык, Узбекистан

**Ершегев Махмуд
Ахбаралиевич**

Базовая докторантура
Алмалыкского государственного
технического института,
Алмалык, Узбекистан

**Сидиков Равшан
Мирзабекович**

Директор 1-й медно-
обогащительной фабрики АО
«Алмалыкский горно-
металлургический комбинат»,
Алмалык, Узбекистан

**Ахмадийев Алишер
Мадаминovich**

Главный инженер
медеплавильной обогащительной
фабрики № 1 АО «Алмалыкский
горно-металлургический
комбинат», Алмалык,
Узбекистан

Аннотация. В работе изучены режимные факторы процесса извлечения золота из медно-порфировой руды на центробежном концентраторе. Руда бедная, содержание золота 0,38 г/т; основная масса металла (69,12 %) приходится на частицы крупностью 2–8 мкм. Опыты выполнены на лабораторном аппарате «Knelson» KC-MD3 при измельчении руды до 80% класса –0,074 мм. Центробежная сила (G) изменялась от 30 до 150 ×g, время цикла (t) — от 10 до 50 мин. Однофакторные опыты показали наличие выраженного максимума извлечения по G (54,0% при $G \approx 90 \times g$) и выход на плато по времени цикла после ≈ 30 мин. Анализ по классам крупности установил, что сила практически не влияет на крупные (+74 мкм) частицы, тогда как в классе 2–8 мкм извлечение изменяется от 28 до 38%. Полный факторный эксперимент 2^2 с трёхкратным повторением центральной точки и дисперсионный анализ дали линейный эффект G +2,75%, времени цикла +2,25%, взаимодействие –1,75%, кривизну +5,43% ($p < 0,001$). Это доказывает нелинейность поверхности отклика и расположение оптимума внутри области эксперимента ($\approx 90 \times g$; ≈ 30 мин). Также зафиксированы показатели по серебру: его извлечение подчиняется той же закономерности и в оптимальном режиме составляет 25,0% при содержании серебра в концентрате 108 г/т.

Ключевые слова: медно-порфировая руда, G-фактор, время цикла, извлечение золота и серебра, полный факторный эксперимент, дисперсионный анализ, поверхность отклика, эффект кривизны, математическое моделирование процесса.

EVALUATION OF THE EFFECT OF G-FACTOR AND CYCLE TIME ON GOLD AND SILVER RECOVERY FROM COPPER-PORPHYRY ORE USING A CENTRIFUGAL CONCENTRATOR BASED ON A FACTORIAL EXPERIMENT

**Larionov Sergey
Vladimirovich**

Deputy Chairman of the
Management Board of Almalyk
Mining and Metallurgical Complex
JSC, Acting Chief Engineer,
Almalyk, Uzbekistan

**Ershegeev Makhmud
Akhbaraliyevich**

Basic doctoral program at Almalyk
State Technical Institute, Almalyk,
Uzbekistan

**Sidikov Ravshan
Mirzabekovich**

Director of the 1st Copper
Concentration Plant of JSC
Almalyk Mining and Metallurgical
Complex, Almalyk, Uzbekistan

**Akhmadiyev Alisher
Madaminovich**

Chief Engineer of Copper Smelting
and Processing Plant No. 1, JSC
“Almalyk Mining and Metallurgical
Complex,” Almalyk, Uzbekistan

Abstract. The work examines the operating factors of gold and silver recovery from the copper-porphyry ore on a centrifugal concentrator. The ore is low-grade, containing 0.38 g/t Au; the bulk of the metal (69.12%) occurs as 2–8 μm particles. The tests were run on a laboratory Knelson KC-MD3 unit with the ore ground to 80% passing 0.074 mm. The centrifugal force (G) was varied from 30 to 150 $\times g$ and the cycle time (t) from 10 to 50 min. Single-factor tests showed a distinct maximum of recovery with respect to G (54.0% at $G \approx 90 \times g$) and a plateau with respect to cycle time beyond ≈ 30 min. A size-by-size analysis established that the force has almost no effect on coarse (+74 μm) particles, whereas in the 2–8 μm class recovery varies from 28 to 38%. A 2^2 full factorial design with a triplicated centre point, processed by analysis of variance, yielded a linear effect of G of +3.25%, of cycle time +2.75%, an interaction of –1.25% and a curvature of +5.18% ($p < 0.001$). This proves the non-linearity of the response surface and the location of the optimum inside the experimental region ($\approx 90 \times g$; ≈ 30 min).

Silver recovery was also recorded: it follows the same pattern as gold and reaches 25.0 % at the optimum, with 108 g/t Ag in the concentrate.

Keywords: *copper-porphyry ore, G-factor, cycle time, gold and silver recovery, full factorial design, analysis of variance, response surface, curvature effect, process mathematical modelling.*

Kirish. Xomashyoning texnologik xossalari, pirovardida esa tanlanadigan sxema ham, uning moddiy-mineralogik tavsifidan kelib chiqadi. Tadqiq etilayotgan mis-porfir ma'dani uchun bunday tavsif avvalgi ishlarimizda olingan [12–14]: oltin asosan sof tug'ma holatda uchraydi (o'rtacha proba 890), uning 69,12% i 2–8 mkm sinfga jamlangan, erkin shakldagi ulushi 26,62% ni, sianlash bilan eritmaga o'tish darajasi esa 89,88 % ni tashkil etadi; ayrim donalarning yirikligi 500 mkm gacha yetadi. Bu ko'rsatkichlar bir vaqtning o'zida ham imkoniyat, ham cheklovni anglatadi. Oltinning erkin holatda bo'lishi uni flotatsiyagacha zichlik farqi bo'yicha ajratib olishga yo'l ochadi; metall massasining nozik sinfdagi to'planishi esa bunday ajratishni an'anaviy apparatlar bilan amalga oshirish imkonini bermaydi.

Shlyuz, konsentratsion stol yoki vintli separatora ajratuvchi kuch sifatida faqat og'irlik kuchi ishlaydi. Aynan shu sabab ularning imkoniyati 50–75 mkm atrofida tugaydi: bundan mayda zarra uchun cho'kish tezligi oqim ta'siriga qarshi tura olmaydi [11]. Ma'danimizdagi oltinning asosiy qismi esa shu chegaradan pastda joylashgan, shuning uchun tanlov markazdan qochma (fluidizatsiyalangan) konsentratorlarga to'xtadi. Ularda zarraga ta'sir etuvchi tezlanish o'nlab, ba'zan yuzlab marta kuchaytiriladi va nozik og'ir zarralar ham ushlanish imkoniga ega bo'ladi. Bunday oldindan boyitishning yana bir afzalligi — u reagent talab qilmaydi va erkin oltinni flotatsiyaga qadar alohida, yuqori sifatli mahsulotga chiqaradi.

Markazdan qochma konsentratorning ko'rsatkichlari uning ish rejimiga o'ta sezgir. Rejim noto'g'ri tanlansa, apparatning nazariy imkoniyati amalda ro'yobga chiqmay qoladi. Ta'sir etuvchi omillar orasida markazdan qochma kuch (G-omil) bilan sikl vaqti yetakchi o'rinni egallaydi: birinchisi zarraning cho'kish tezligini, ikkinchisi rifllardagi boyitma qatlamining to'lish darajasini boshqaradi.

Ushbu tadqiqot ishining yangiligi ikki jihatda namoyon bo'ladi. Birinchi jihat, markazdan qochma kuch optimumining ma'dan oltinining o'lcham-fazaviy tarkibi bilan miqdoriy bog'liqligi o'lcham

sinflari kesimida birinchi marta ochib beriladi. Ikkinchi jihat, optimumning tajriba sohasi ichida joylashgani egrilik effekti orqali statistik tasdiqlanadi.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. So'nggi o'n yilliklarda kuchaytirilgan gravitatsiya apparatlari oltin saqlovchi xomashyoni qayta ishlashda mustahkam o'rin egalladi [10]; bu guruhda «Knelson» konsentratori eng ko'p qo'llaniladigan yechim hisoblanadi. Chen [1] uning konstruktiv rivojlanishini umumlashtirar ekan, rotor tezligi va fluidizatsiyalovchi suv sarfini asosiy boshqariluvchi parametrlar deb belgilaydi, biroq bu parametrlarning maqbul qiymatlari xomashyoga qarab qanday siljishi ochiq qoldiriladi. «Falcon» apparati bo'yicha Farajzadeh va Chehreh Chelgani [2] olgan natijalar ham shu yo'nalishda: ajratish mexanizmi tavsiflanadi, ammo rejimni tanlash mezonini umumiy holda beriladi. Majumder va Barnwal [6] bu vaziyatga bevosita izoh beradi — mavjud modellarning aksariyati empirik bo'lib, ular ma'dan turiga bog'liq koeffitsiyentlarsiz ishlamaydi.

Tajribani matematik rejalashtirish shu bo'shliqni to'ldirish vositasi sifatida qaraladi. Marion va hammualliflar [7] laboratoriya «Knelson» konsentratorida nozik hamda past zichlikdagi minerallar uchun rejim omillarini to'liq faktorli reja bo'yicha baholagan; Katwika va hammualliflar [4] shunga o'xshash yondashuvni mis-kobalt boyitish chiqindilarida sinab ko'rgan. Xomashyoni tavsiflash tomonidan esa Laplante va hammualliflar [5] gravitatsion ajraladigan oltin (GRG) tushunchasini va uni laboratoriyada aniqlash tartibini taklif qilgan. Ko'rinadiki, statistik reja ham, xomashyoni baholash usuli ham allaqachon shakllangan, biroq ular odatda alohida-alohida qo'llaniladi.

Ko'rib chiqilgan ishlar markazdan qochma ajratishning umumiy qonuniyatlari yetarlicha o'rganilganini ko'rsatadi. Ayni paytda kuch optimumini muayyan ma'dan oltinining o'lcham-fazaviy tarkibi bilan miqdoriy bog'lash masalasi, ayniqsa Olmaliq kon hududi mis-porfir ma'danlari misolida, deyarli ko'tarilmagan. Ushbu ish aynan

shu bo'shliqqa qaratilgan.

Tadqiqot uchun «Yoshlik I» hamda Qalmoqqir koni [3] mis-porfir ma'danining texnologik namunasi olindi: Au 0,38 g/t, Cu 0,34%, Mo 0,0053%. Tajribalar «Knelson» KC-MD3 konsentratorida, ma'dan 80% -0,074 mm gacha maydalangan holatda bajarildi. Har bir tajribada boyitma va chiqindi mahsulotlari alohida olinib, ulardagi metall tarkibi probirlash (assay) hamda atom-absorbsion usullarda aniqlandi. Texnologik ko'rsatkichlar, ya'ni mahsulot unumi (γ), metall ajralib chiqishi (ϵ) va boyitma tarkibi (β), metall balansi bo'yicha hisoblandi.

Markazdan qochma maydonda zarraga ta'sir etuvchi nisbiy tezlanish, ya'ni G-omil, quyidagicha aniqlanadi:

$$G = \frac{\omega^2 r}{g} = \frac{\pi^2 N^2 r}{900 g} \quad (1)$$

bu yerda ω — rotorning burchak tezligi, rad/s; N — aylanishlar soni, ayl/min; r — rotor radiusi, m; g — erkin tushish tezlanishi, m/s². KC-MD3 rotori uchun ($r \approx 0,0375$ m) $G = 90$ qiymati taxminan 1460 ayl/min ga mos keladi.

Zarralarning markazdan qochma maydondagi cho'kish tezligini Stoks qonunining kuchaytirilgan ko'rinishida baholash mumkin:

$$v_g = \frac{d^2(\rho_s - \rho_f)gG}{18\mu} \quad (2)$$

bu yerda v_g — zarraning markazdan qochma maydondagi cho'kish tezligi, m/s; d — zarra diametri, m; ρ_s va ρ_f — mos ravishda zarra va suyuqlik zichligi, kg/m³; μ — suyuqlikning dinamik qovushqoqligi, Pa·s. Ifodadan ikki bog'liqlik kelib chiqadi: tezlik zarra diametrining kvadratiga, shuningdek G-omilga chiziqli tarzda bog'langan. Demak, o'lcham kichraygan sari yo'qolgan tezlikni faqat maydonni kuchaytirish hisobiga qoplash mumkin. Agar zarraning ishonchli ushlanishi uchun kerakli eng kichik cho'kish tezligi o'zgarmas deb qabul qilinsa, gravitatsion ajratib olinadigan eng kichik zarra o'lchami markazdan qochma kuchning kvadrat ildiziga teskari proporsional bo'ladi, ya'ni $d \sim G^{-0,5}$; ajratib olinadigan eng kichik oltin o'lchamini ikki barobar kichraytirish uchun kuchni taxminan to'rt barobar oshirish talab etiladi.

Gravitatsion ajratishning printsiplial imkoniyati konsentratsiya mezoni (CC) yordamida baholanadi:

$$CC = \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \quad (3)$$

bu yerda ρ_h va ρ_l — mos ravishda og'ir va yengil komponent zichligi, kg/m³; ρ_f — suyuqlik zichligi, kg/m³. Amaliyotda CC qiymati 2,5 dan oshsa, zichlik farqi ajratish uchun yetarli deb qabul qilinadi [8, 11]. «Yoshlik I» va Qalmoqqir ma'dani uchun oltin (proba 890, $\rho \approx 17,5$ g/sm³) va kvars ($\rho \approx 2,65$ g/sm³) juftligida $CC \approx 10,0$ bo'lib, bu oltinni hatto nozik sohada ham gravitatsion ajratish uchun juda qulay sharoitni anglatadi. Solishtirish uchun, xalkopirit uchun $CC \approx 1,94$, molibdenit uchun esa $CC \approx 2,24$ — ya'ni mis va molibden minerallari gravitatsiya bilan ancha kam ajraladi, bu esa gravitatsion boyitmada ularning kam to'planishini oldindan tushuntiradi.

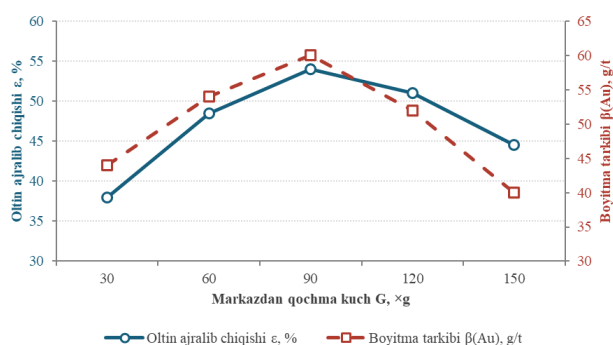
Omillarning birgalikdagi ta'sirini o'rganish uchun 2² to'liq faktorli reja qo'llanildi. Omillar sifatida markazdan qochma kuch G (quyi sath 60×g, yuqori sath 120 ×g) hamda sikl vaqti t (20 va 40 min) olindi; kodlangan o'zgaruvchilar $x_1 = (G-90)/30$ va $x_2 = (t-30)/10$ ko'rinishida kiritildi. Bunday reja har bir omilning alohida hissasini ham, ularning birgalikdagi ta'sirini ham ajratib ko'rsatadi. Reja markazi (90 ×g; 30 min) uch marta takrorlandi — bu takrorlashlar ikki vazifani bajardi: tasodifiy xatolik dispersiyasini baholadi va javob sirtining egriligini tekshirish uchun mustaqil qiyoslash nuqtasini berdi. Markaziy nuqta natijasining burchak nuqtalari o'rtachasidan chetlanishi chiziqli modelning yetarli emasligini, ya'ni kvadratik hadlar zarurligini bildiradi. Barcha natijalar dispersion tahlil (ANOVA) yordamida qayta ishlandi.

Natijalar. Markazdan qochma kuchning ta'sirini aniqlash maqsadida G qiymati 30 dan 150 ×g gacha o'zgartirildi, qolgan ko'rsatkichlar o'zgarishsiz saqlandi: sikl vaqti 30 min, yuvuvchi suv bosimi 50 kPa, qattiq faza 30 %. Natijalar 1-jadval va 1-rasmda berilgan.

1-jadval

Markazdan qochma kuchning oltin va kumush ajralib chiqishiga ta'siri

Markazdan qochma kuch G, ×g	Oltin ajralib chiqishi ϵ (Au), %	Boyitma tarkibi β (Au), g/t	Kumush ajralib chiqishi ϵ (Ag), %	Boyitma tarkibi β (Ag), g/t
30	38,0	44	17,0	79
60	48,5	54	22,0	97
90	54,0	60	25,0	108
120	51,0	52	23,3	94
150	44,5	40	20,1	72



1-rasm. Markazdan qochma kuchning oltin ajralib chiqishi (ε) va boyitma tarkibiga (β) ta'siri.

Tajriba natijalariga ko'ra, kuch ortishi bilan oltin ajralib chiqishi dastlab o'sadi: 30 ×g da 38,0% dan 90×g da 54,0% gacha ko'tariladi. Keyin pasayish boshlanadi va 150×g da ko'rsatkich 44,5% ga tushadi. Boyitmadagi oltin tarkibi ham 90 ×g da eng yuqori qiymatga, 60 g/t ga erishadi. Past kuchda markazdan qochma maydon ma'danning asosiy massasini tashkil etuvchi 2–8 mkm li zarralarni cho'ktirishga yetmaydi va ular chiqindi bilan yo'qoladi; bundan tashqari qatlamga yengil bo'sh jins qisman o'tib, boyitma sifatini tushiradi. Kumush ham shu qonuniyatga bo'ysunadi: uning ajralib chiqishi 30×g da 17,0% dan 90×g da 25,0% gacha oshib, boyitmadagi kumush tarkibi 108 g/t ga yetadi. Ikkala metall maksimumining bir xil nuqtaga to'g'ri kelishi kumushning sezilarli qismi tug'ma oltin bilan birikkan elektrum holatida bo'lishi bilan izohlanadi.

2-jadval

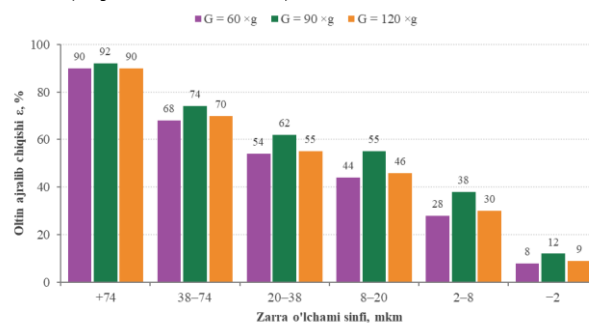
Turli markazdan qochma kuchda oltin ajralib chiqishining o'lcham sinflari bo'yicha taqsimoti, %

Zarra o'lchami sinfi, mkm	G = 60 ×g	G = 90 ×g	G = 120 ×g
+74	90	92	90
38–74	68	74	70
20–38	54	62	55
8–20	44	55	46
2–8	28	38	30
–2	8	12	9

Kuch me'yordan oshganda manzara bosh-qacha bo'ladi: zarralar qatlami ortiqcha zichlashadi, siljish kuchlari ta'sirida oldin ushlangan mayda oltin qatlamdan qayta yuviladi, ayni paytda kuchli maydon qatlamga o'rtacha zichlikdagi mineral zarralarni ham siqib kiritadi. Oqibatda ajralib chiqish ham, boyitma sifati ham pasayadi. Ikkala ko'rsatkich bo'yicha maqbul nuqta deyarli ustma-

ust tushadi va $G \approx 90 \times g$ atrofida joylashadi.

Ta'sir mexanizmini batafsilroq ochish uchun uch xil kuchda (60, 90 va 120×g) oltin ajralib chiqishi zarra o'lchami sinflari kesimida tahlil qilindi (2-jadval, 2-rasm).



2-rasm. Markazdan qochma kuchning oltin ajralib chiqishiga o'lcham sinflari kesimida ta'siri.

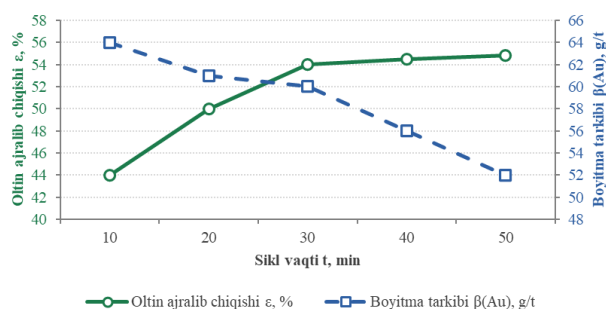
Tahlil natijasi quyidagicha bo'ldi. Yirik, ya'ni +74 mkm zarralar barcha rejimda deyarli to'liq (90–92%) ajratib olinadi va kuchga sezilarli bog'liq emas. Mayda sinflarda bog'liqlik keskin namoyon bo'ladi: 2–8 mkm sinfdagi ajralib chiqish $G=60 \times g$ da 28% dan $G=90 \times g$ da 38% gacha ko'tariladi, $G = 120 \times g$ da esa 30% ga qaytadi. Bu ma'dan oltinining granulometrik-fazaviy tarkibi bilan markazdan qochma kuch orasidagi bevosita bog'liqlikni isbotlaydi: mayda erkin oltinni ushlash uchun kuchli maydon zarur, biroq haddan ortiq kuch uni qayta yuvib yuboradi. $G \approx 90 \times g$ qiymati aynan shu ikki talab o'rtasidagi muvozanatni ta'minlaydi.

Sikl vaqtining, ya'ni boyitma to'planish davrining ta'siri alohida o'rganildi. U 10 dan 50 min gacha o'zgartirildi ($G=90 \times g$, suv bosimi 50 kPa, qattiq faza 30%). Natijalar 3-jadval va 3-rasmda keltirilgan.

3-jadval

Sikl vaqtining boyitish ko'rsatkichlariga (oltin va kumush) ta'siri

Sikl vaqti t, min	Oltin ajralib chiqishi ε(Au), %	Boyitma tarkibi β(Au), g/t	Kumush ajralib chiqishi ε(Ag), %	Boyitma tarkibi β(Ag), g/t
10	44,0	64	19,8	115
20	50,0	61	22,6	110
30	54,0	60	25,0	108
40	54,5	56	25,2	101
50	54,8	52	25,3	94



3-rasm. Sikl vaqtining oltin ajralib chiqishi (ε) va boyitma tarkibiga (β) ta'siri.

Sikl uzayishi bilan ajralib chiqish avvaliga tez o'sadi: 10 min da 44,0% dan 30 min da 54,0% gacha. So'ngra o'sish deyarli to'xtab, plato hosil bo'ladi (40 min da 54,5%, 50 min da 54,8%). Boyitma tarkibi esa aksincha, 64 g/t dan 52 g/t gacha kamayadi, chunki uzoq sikl davomida qatlamda bo'sh jins ko'proq to'planadi. Ajralib chiqishning to'yinishi va sifatning hali yuqoriligini hisobga olib, maqbul sikl vaqti sifatida ≈ 30 min qabul qilindi: bundan ortig'i ajralib chiqishga deyarli qo'shimcha bermaydi, ammo sifatni pasaytiradi hamda qatlamning haddan tashqari to'lib ketishi xavfini oshiradi. Kumush ajralib chiqishi ham shu tarzda 30 min dan keyin platoga chiqadi (25,0 $\rightarrow$ 25,3%), boyitmadagi kumush tarkibi esa 115 dan 94 g/t gacha pasayadi.

Ikki omilning birgalikdagi ta'sirini va ular orasidagi bog'liqlikni miqdoriy baholash uchun optimum atrofida 2^2 to'liq faktorli tajriba o'tkazildi. Reja matritsasi hamda olingan natijalar 4-jadvalda keltirilgan.

4-jadval

2^2 to'liq faktorli tajriba matritsasi va natijalari

Tajriba №	G, xg	t, min	x_1	x_2	$\epsilon(\text{Au})$, %
1	60	20	-1	-1	45,0
2	120	20	+1	-1	49,5
3	60	40	-1	+1	49,0
4	120	40	+1	+1	51,0
5 (M)	90	30	0	0	53,6
6 (M)	90	30	0	0	54,0
7 (M)	90	30	0	0	53,8

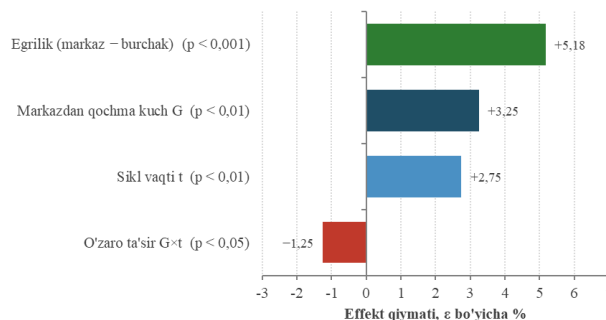
Faktorli tajriba natijalari dispersion tahlildan o'tkazilib, omillar effektlari va ularning statistik ahamiyati aniqlandi (5-jadval, 4-rasm). Markazdan qochma kuchning chiziqli effekti +3,25%, sikl vaqtiniki +2,75% ni tashkil etdi, ya'ni ikkala omil ham ajralib chiqishga musbat ta'sir ko'rsatadi. Omillarning o'zaro ta'siri ($G \times t$) kuchsiz va manfiy chiqdi (-1,25%): kuch yuqori bo'lganda sikl vaqtini

uzaytirishning qo'shimcha foydasi kamayadi.

5-jadval

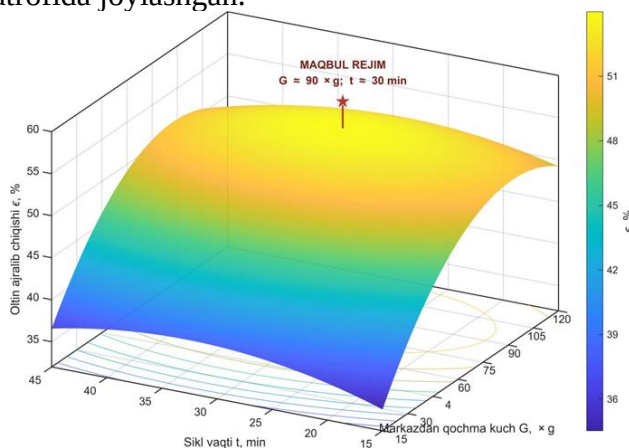
Faktorli tajriba natijalarining dispersion tahlili (ANOVA)

Dispersiya manbai	SS	df	MS	F	p
G (chiziqli)	10,56	1	10,56	264,1	< 0,01
t (chiziqli)	7,56	1	7,56	189,1	< 0,01
$G \times t$ (o'zaro ta'sir)	1,56	1	1,56	39,1	< 0,05
Egrilik	45,91	1	45,91	1148	< 0,001
Xatolik (markaz)	0,08	2	0,04	—	—
Jami	65,68	6	—	—	—



4-rasm. Omillar effektlari va ularning statistik ahamiyati diagrammasi.

Eng e'tiborli natija markaziy nuqta bilan bog'liq. Undagi o'rtacha ajralib chiqish 53,8 % bo'lib, burchak nuqtalari o'rtachasidan (48,6 %) ancha yuqori. Bu +5,18 % li kuchli musbat egrilikni bildiradi. Dispersion tahlil farqning statistik ahamiyatli ekanini tasdiqladi ($F = 1148$; $p < 0,001$), tajriba xatoligi esa juda kichik chiqdi ($MS = 0,04$). Demak, javob sirti qavariq bo'lib, optimum reja sohasining ichida, taxminan $90 \times g$ va 30 min atrofida joylashgan.



5-rasm. Oltin ajralib chiqishi (ε) javob sirtining markazdan qochma kuch va sikl vaqti bo'yicha izochiziqlari.

Faktorli tajriba natijalari asosida kodlangan

o'zgaruvchilarda javob sirtining ikkinchi tartibli yaqinlashishi qurildi, uning izochiziqlari 5-rasmda tasvirlangan. Diagrammada javob sirti markaz tomon ko'tarilib, yopiq qavariq shakl hosil qiladi. Bu ekstremum reja burchaklarida emas, uning ichida ekanini va chiziqli modelning yaroqsizligini ko'rgazmali tarzda tasdiqlaydi.

Muhokama. Tajriba ishi natijalari markazdan qochma kuchning ta'siri ikki qarama-qarshi mexanizm muvozanatidan iborat ekanini ko'rsatadi. Birinchisi cho'ktirish: kuch ortgan sari mayda og'ir zarralarning rotor devoriga cho'kish tezligi oshadi va ular rifllarda ushlanib qoladi. Ikkinchisi qayta yuvish: kuch me'yordan oshsa, boyitma qatlami zichlashadi, undagi siljish kuchlari kuchayadi va ilgari ushlangan mayda oltin chiqarib yuboriladi. Birinchi mexanizm kuchga chiziqli yaqin tarzda, ikkinchisi kuchliroq nochiziqlik bilan ta'sir qilgani bois ularning yig'indisi aniq maksimumga ega funktsiya beradi. 1-rasmdagi egri chiziqning shakli hamda dispersion tahlilda aniqlangan musbat egrilik shu bilan izohlanadi.

O'lcham sinflari bo'yicha tahlil (2-rasm) bu talqinni bevosita quvvatlaydi. Yirik zarralar uchun cho'kish tezligi allaqachon yetarli, shu sababli kuchni oshirish qo'shimcha foyda bermaydi. 2–8 mkm sinfda esa, ya'ni ma'dan oltinining asosiy massasi joylashgan sohada, ajralib chiqish kuchga keskin sezgir va aynan shu sinf umumiy ko'rsatkichning optimumini shakllantiradi. Bundan kelib chiqadiki, markazdan qochma kuch optimumi apparatning universal tavsifi emas, balki muayyan ma'dan oltinining o'lcham taqsimotiga bog'liq kattalikdir. Bu xulosa Majumder va Barnwal [6] ta'kidlagan modellarning ma'danga bog'liqligi qoidasiga mos tushadi hamda Marion [7] natijalari bilan sifat jihatidan uyg'unlashadi.

Sikl vaqtining ta'sirini boyitma qatlamining to'lish dinamikasi tushuntiradi. Sikl boshida rifllar bo'sh, og'ir zarralar uchun joy ko'p; vaqt o'tgan sari rifllar to'ladi va yangi kelayotgan zarralarni ushlash imkoniyati kamayadi. Shuning uchun ajralib chiqish avvaliga tez o'sib, keyin to'yinadi. Uzoq sikl davomida qatlamda o'rtacha zichlikdagi minerallar ham to'planib, boyitma sifatini tushiradi. O'zaro ta'sirning manfiy ishorasi ham ayni shu bilan bog'liq: yuqori kuchda qatlam tezroq to'yinadi.

Egrilikning statistik ahamiyatli chiqishi muhim metodologik xulosaga olib keladi. Jarayonni

chiziqli model bilan to'liq tavsiflab bo'lmaydi, optimumni aniq topish uchun ikkinchi tartibli model kerak. Amalda bu keyingi bosqichda tajriba sohasini o'qiy nuqtalar bilan kengaytirib, markaziy kompozitsion reja asosida kvadratik regressiya modelini qurishni taqozo qiladi.

Amaliy va raqamli boshqaruv nuqtai nazaridan kuchni qat'iy bir qiymatda emas, maqbul atrofidagi tor oralikda (80–100 ×g) ushlab turgan ma'qul: shu oralikda oltin ajralib chiqishi 52% dan pastga tushmaydi. Kuch rotor aylanishlar soni orqali (1) ifoda bo'yicha bevosita sozlanadi, KC-MD3 uchun 90 ×g qiymatiga taxminan 1460 ayl/min mos keladi. Bu esa parametрни chastota o'zgartirgich yordamida avtomatik boshqarishga to'liq imkon beradi. Aniqlangan effektlar va egrilik qiymatlari jarayonning raqamli modelini qurish uchun tayyor sonli asos vazifasini o'taydi [9].

Xulosa. “Yoshlik I” va Qalmoqqir konlari mis-porfir ma'danidan oltinni «Knelson» KC-MD3 konsentratorida ajratib olishda markazdan qochma kuch hal qiluvchi omil ekanini aniqlandi: G ning 30 dan 150×g gacha o'zgarishida ajralib chiqish $G \approx 90 \times g$ da 54,0% maksimumga erishadi, boyitma tarkibi ham shu nuqtada eng yuqori (60 g/t) bo'ladi.

Kuch optimumi ma'dan oltinining o'lcham-fazaviy tarkibi bilan bevosita bog'liq: yirik (+74 mkm) zarralar barcha rejimda 90–92 % darajasida ajratiladi, 2–8 mkm sinfda esa ajralib chiqish 28 % dan 38 % gacha o'zgaradi va aynan shu sinf umumiy optimumni shakllantiradi.

Sikl vaqti ortishi bilan ajralib chiqish ≈ 30 min dan keyin platoga chiqadi (54,0 → 54,8 %), boyitma tarkibi esa 64 dan 52 g/t gacha pasayadi. Shu sababli maqbul sikl vaqti sifatida ≈ 30 min asoslandi.

2² to'liq faktorli tajriba va dispersion tahlil markazdan qochma kuchning chiziqli effekti +3,25%, sikl vaqtiniki +2,75%, ularning o'zaro ta'siri esa –1,25% ekanini ko'rsatdi; barcha effektlar statistik ahamiyatli.

Egrilik effekti +5,18% ($F=1148$; $p<0,001$) bo'lib, javob sirtining nochiziqli ekanini va optimumning tajriba sohasi ichida ($\approx 90 \times g$; ≈ 30 min) joylashganini isbotlaydi. Demak, jarayonni to'liq tavsiflash uchun ikkinchi tartibli regressiya modeli talab etiladi.

Amaliy jihatdan markazdan qochma kuchni 80–100×g oralig'ida ushlab turish tavsiya etiladi; KC-MD3 uchun bu rotorning taxminan 1460

ayl/min tezligiga mos keladi va parametr chastota o'zgartirgich yordamida avtomatik boshqarishga to'liq yaroqlidir.

Amaliy jihatdan markazdan qochma kuchni 80–100×g oralig'ida ushlab turish tavsiya etiladi;

KC-MD3 uchun bu rotorning taxminan 1460 ayl/min tezligiga mos keladi va parametr chastota o'zgartirgich yordamida avtomatik boshqarishga to'liq yaroqlidir.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Chen, Q., Yang, H.-Y., Tong, L.-L., Niu, H.-Q., Zhang, F.-S., & Chen, G.-M. (2020). Research and application of a Knelson concentrator: A review. *Minerals Engineering*, 152, 106339. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106339>
- [2] Farajzadeh, S., & Chehreh Chelgani, S. (2022). Gravity separation by Falcon concentrator—An overview. *Separation Science and Technology*, 57(13), 2145–2164. <https://doi.org/10.1080/01496395.2022.2028836>
- [3] Golovanov, I. M., Seltmann, R., & Kremenetsky, A. A. (2005). The porphyry Cu-Au/Mo deposits of Central Eurasia: 2. The Almalyk (Kalmakyr–Dalnee) and Saukbulak Cu-Au porphyry systems, Uzbekistan. In *Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective* (Vol. 2, pp. 513–523). PGC Publishing.
- [4] Katwika, C. N., Kime, M. B., Kalenga, P. N. M., Mbuya, B. I., & Mwilen, T. R. (2019). Application of Knelson concentrator for beneficiation of copper–cobalt ore tailings. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 40(1), 35–45.
- [5] Laplante, A. R., Woodcock, F., & Huang, L. (2000). A laboratory procedure to characterise gravity recoverable gold. *SME Transactions*, 308, 53–59.
- [6] Majumder, A. K., & Barnwal, J. P. (2006). Modeling of enhanced gravity concentrators—Present status. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 27(1), 61–86. <https://doi.org/10.1080/08827500500339307>
- [7] Marion, C., Langlois, R., Kokkiliç, O., Zhou, M., Williams, H., Awais, M., Rowson, N. A., & Waters, K. E. (2019). A design of experiments investigation into the processing of fine low specific gravity minerals using a laboratory Knelson Concentrator. *Minerals Engineering*, 135, 139–155.
- [8] Shakarov, T. I., & Xasanov, A. S. (2025). Foydali qazilmalarni boyitish va qayta ishlash asoslari: Oliy o'quv yurtlari uchun darslik. «Muharrir» nashriyoti.
- [9] Sidiqov, R. M., Ergashev, M. A., Axmadaliyev, A. M., & Abdurazakov, U. M. (2026). Polimetall rudalarini boyitishda kombinatsiyalashgan texnologiyaning samaradorligini tadqiq etish. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(2), 61–66.
- [10] Surimbayev, B., Bolotova, L., Akcil, A., Yessengarayev, Y., & Khumarbekuly, Y. (2024). Gravity concentration of gold-bearing ores and processing of concentrates: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. <https://doi.org/10.1080/08827508.2024.2395824>
- [11] Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Wills' mineral processing technology* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.
- [12] Хасанов, А. С., & Эргашев, М. А. (2023). Изучение золота в пробе руды месторождения «Ёшлик I». *Ijodkor o'qituvchi*, 3(33), 236–242.
- [13] Хасанов, А. С., Турдиев, Ш. Ш., Эргашев, М. А., & Махситалиева, Л. О. (2024a). Изучение вещественного состава руды, гранулометрический анализ месторождений «Кальмакыр» и «Ёшлик I». *Перспективы развития композиционных материалов: Республиканская научно-техническая конференция* (с. 170–171). Ташкент.
- [14] Хасанов, А. С., Турдиев, Ш. Ш., Эргашев, М. А., & Махситалиева, Л. О. (2024b). Изучение формы нахождения благородных металлов в рудах месторождения «Кальмакыр». *Перспективы развития композиционных материалов: Республиканская научно-техническая конференция* (с. 173–174). Ташкент.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Axmadaliyev, A. M., Ergashev, M. A., Larionov, S. V., & Sidiqov, R. M. (2026). Mis-porfir ma'danidan oltin va kumushni markazdan qochma konsentrator yordamida ajratib olishda G-omil va sikl vaqti ta'sirini faktorli tajriba asosida baholash. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.24>

UO‘K: 004.056.55:003.26

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.13

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

KO‘P O‘ZGARUVCHILI KRIPTOGRAFIK TIZIMLAR VA ULARNING TAHLILI



Mustafoyev Azamat Botir o'g'li

“Unicon.uz” – Fan-texnik va marketing tadqiqotlari markazi MChJ, Toshkent, O‘zbekiston

Email: mustafoyevazamat01@gmail.com

ORCID ID: 0009-0002-0495-0567

Science ID: MQD-0826-0151

Annotatsiya. Ushbu maqolada postkvant kriptografiyaning istiqbolli yo‘nalishlaridan biri hisoblangan ko‘p o‘zgaruvchili kriptografik tizimlarning nazariy asoslari, tuzilishi va xavfsizlik xususiyatlari tahlil qilingan. Ko‘p o‘zgaruvchili kvadratik tenglamalar tizimlariga asoslangan MQ (Multivariate Quadratic) va IP (Isomorphism of Polynomials) masalalarining hisoblash murakkabligi hamda ularning kriptografik tizimlar barqarorligini ta‘minlashdagi o‘rni ko‘rib chiqilgan. Shuningdek, UOV (Unbalanced Oil and Vinegar) va Rainbow raqamli imzo sxemalarining tuzilishi, ishlash tamoyillari, afzalliklari va xavfsizlik jihatlari yoritilgan. Ko‘p o‘zgaruvchili kriptografik sxemalarga nisbatan qo‘llaniladigan asosiy kriptotahlil usullari va ehtimoliy hujumlar tahlil qilinib, ularning postkvant axborot xavfsizligi tizimlarida qo‘llash imkoniyatlari baholangan.

Kalit so‘zlar: postkvant kriptografiya, ko‘p o‘zgaruvchili kriptografiya, MQ masalasi, IP masalasi, UOV, Rainbow, raqamli imzo, kriptotahlil, axborot xavfsizligi, kvantga bardoshli kriptografiya.

Received: 11.06.2026

Accepted: 19.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

МНОГОПЕРЕМЕННЫЕ КРИПТОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ АНАЛИЗ

Мустафоев Азамат Ботир угли

ООО «Unicon.uz» — Центр научно-технических и маркетинговых исследований, Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В статье проанализированы теоретические основы, структура и особенности безопасности многовариантных криптографических систем как одного из перспективных направлений постквантовой криптографии. Рассмотрены вычислительная сложность задач MQ (Multivariate Quadratic) и IP (Isomorphism of Polynomials), основанных на системах многомерных квадратичных уравнений, а также их роль в обеспечении криптографической стойкости. Освещены структура, принципы функционирования, преимущества и аспекты безопасности схем цифровой подписи UOV (Unbalanced Oil and Vinegar) и Rainbow. Проанализированы основные методы криптоанализа и возможные атаки на многовариантные криптографические схемы, а также оценены перспективы их применения в постквантовых системах информационной безопасности.

Ключевые слова: постквантовая криптография, многовариантная криптография, задача MQ, задача IP, UOV, Rainbow, цифровая подпись, криптоанализ, информационная безопасность,

квантово-устойчивая криптография.

MULTIVARIATE CRYPTOGRAPHIC SYSTEMS AND THEIR ANALYSIS

Mustafaev Azamat Botir ugli

“Unicon.uz” LLC — Center for Scientific, Technical and Marketing Research, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. This article analyzes the theoretical foundations, structure, and security features of multivariate cryptographic systems as one of the promising areas of post-quantum cryptography. The computational complexity of the MQ (Multivariate Quadratic) and IP (Isomorphism of Polynomials) problems based on systems of multivariate quadratic equations and their role in ensuring cryptographic security are considered. The structure, operating principles, advantages, and security aspects of the UOV (Unbalanced Oil and Vinegar) and Rainbow digital signature schemes are discussed. The main cryptanalytic methods and potential attacks against multivariate cryptographic schemes are analyzed, and the prospects for their application in post-quantum information security systems are evaluated.

Keywords: post-quantum cryptography, multivariate cryptography, MQ problem, IP problem, UOV, Rainbow, digital signature, cryptanalysis, information security, quantum-resistant cryptography.

Kirish. Kvant kompyuterlarining rivojlanishi zamonaviy kriptografiya oldida jiddiy muammo tug'dirmoqda. Piter Shor tomonidan 1994-yilda taklif qilingan kvant algoritmi RSA, ECC va Diffi-Hellman kabi keng qo'llaniladigan algoritmlarning asosini tashkil etuvchi faktorlash va diskret logarifm masalalarini polinomial vaqtda yechish imkonini beradi. Bu esa hozirgi ochiq kalitli kriptotizimlarning kelajakda kvant kompyuterlar tomonidan buzilishi xavfini keltirib chiqarmoqda, shu sababli postkvant kriptografiya (PQC) yo'nalishi faol rivojlanmoqda.

NIST tomonidan olib borilayotgan postkvant standartlashtirish jarayoni doirasida panjara asosidagi, kodga asoslangan, xeshga asoslangan va ko'p o'zgaruvchili (multivariate) kriptografiya kabi bir qator yondashuvlar taklif etilgan. Ushbu maqolada shulardan biri - ko'p o'zgaruvchili kriptografiya - ko'rib chiqiladi. Uning xavfsizligi cheklangan maydon ustidagi ko'p o'zgaruvchili kvadratik tenglamalar sistemasini yechishning (MQ muammosi) hisoblash murakkabligiga asoslanadi va bu masala hozircha samarali kvant algoritmiga ega emas.

Ko'p o'zgaruvchili kriptotizimlar asosan raqamli imzo sxemalarini yaratishda qo'llaniladi. Ular orasida Unbalanced Oil and Vinegar (UOV) va undan kelib chiqqan Rainbow sxemasi eng mashhuridan hisoblanadi. Rainbow NIST tanlovining final bosqichiga yetgan bo'lsa-da, unga qarshi topilgan so'nggi hujumlar uning xavfsizligiga shubha tug'dirdi, bu esa sohada qo'shimcha tadqiqotlar zarurligini ko'rsatadi.

Mazkur maqolaning maqsadi – postkvant kriptografiyaning istiqbolli yo'nalishlaridan biri bo'lgan ko'p o'zgaruvchili kriptografiyaning asosiy tamoyillarini, MQ va IP muammolarining hisoblash murakkabligini, shuningdek UOV va Rainbow raqamli imzo sxemalarining tuzilishi hamda ishlash prinsiplarini tahlil qilishdan iborat. Tadqiqot doirasida ushbu sxemalarning xavfsizlik xususiyatlari va amaliy qo'llash imkoniyatlari ham ko'rib chiqiladi.

Mazkur maqolada MQ va IP muammolarining matematik mohiyati, shuningdek UOV va Rainbow sxemalarining tuzilishi, kalit generatsiyasi, imzo yaratish va tekshirish jarayonlari tahlil qilinadi.

Metodlar. *Ko'p o'zgaruvchili kriptografiya* (Multivariate Cryptography) - bu post-kvant kriptografiya sohasidagi istiqbolli yo'nalishlardan biri bo'lib, u bir nechta o'zgaruvchilarga ega bo'lgan polinomlar orqali kalit juftliklarini generatsiya qilish tamoyiliga asoslanadi. Ushbu yondashuvda kriptotizimlar cheklangan algebraik maydon ustida aniqlangan ko'p o'zgaruvchili kvadratik tenglamalar sistemasining hisoblash murakkabligidan foydalanadi. Mazkur tenglamalarni yechish algoritmik jihatdan NP-murakkab bo'lgani sababli, bu kriptografik sxemalar klassik va kvant kompyuterlar uchun hisoblash jihatdan bardoshli deb hisoblanadi. Ko'p o'zgaruvchili kriptografiyada asosiy g'oya shundan iboratki, foydalanuvchi maxfiy kalit sifatida oddiy yechiladigan polinom tizimini tanlaydi, so'ngra uni yashirish uchun invertibel (teskari olinadigan) o'zgarishlar bilan aralashtiradi. Ochiq kalit esa

murakkab ko‘rinishga ega bo‘lgan polinomlar tizimi bo‘ladi. Imzo yaratishda foydalanuvchi maxfiy tizimda yechim topadi, uni o‘zgartirib, ochiq tizimga moslashtiradi. Verifikatsiya esa ochiq tizimda amalga oshiriladi.

Ko‘p o‘zgaruvchili kriptografik tizimlar odatda raqamli imzo yaratish uchun ishlatiladi. Shifrlash uchun ishlatiladigan variantlar mavjud bo‘lsa-da, ular kamroq qo‘llaniladi. Eng mashhur algoritmlar orasida:

Rainbow - tez va ixcham imzo yaratish imkonini beradi, NIST tomonidan final bosqichga yetgan.

UOV (Unbalanced Oil and Vinegar) - oddiy tuzilishga ega, lekin ba‘zi hujumlarga nisbatan zaifliklari bor.

GeMSS (Great Multivariate Short Signature) - juda qisqa imzolar yaratadi, lekin hisoblash jihatidan og‘irroq.

Ko‘p o‘zgaruvchili polinom funksiyalar *Ta’rif* 7 (Ko‘p o‘zgaruvchili kvadratik polinom funksiya). F maydon bo‘lsin. $F: F^n \rightarrow F$ funksiyasi ko‘p o‘zgaruvchili funksiya deb ataladi. $x_1, \dots, x_n \in F$ o‘zgaruvchilarga ega p polinom berilgan bo‘lsin. Agar f funksiyani $p(x_1, \dots, x_n)$ ko‘rinishida ifodalash mumkin bo‘lsa, u ko‘p o‘zgaruvchili polinom funksiya deb ataladi (agar F cheklangan bo‘lsa, bu har qanday funksiya uchun mumkin). Agar F faqatgina ikkinchi darajali yoki undan past bo‘lgan hadlarni o‘z ichiga olsa, u ko‘p o‘zgaruvchili kvadratik polinom funksiya (Multivariate quadratic (MQ) polynomial function) deb ataladi. Misol uchun, funksiya $f_1(x_1, x_2, x_3) = x_1^2 x_2 + 2x_1 x_2^2 + 3x_3 + 4$ ko‘p o‘zgaruvchili polinom funksiya (uchinchi darajali), ammo, $f_2(x_1, x_2, x_3) = x_1^2 + 2x_1 x_2 + 3x_3 + 4$ ko‘p o‘zgaruvchili kvadratik polinom funksiya hisoblanadi. $p_1, \dots, p_k$ ko‘p o‘zgaruvchili kvadratik polinom funksiyalar bo‘lsin. $\mathcal{P} = \begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_k \end{pmatrix}$ vektor har

bir komponent uchun qo‘llanilgan funksiyalar yig‘indisi orqali $P: F^n \rightarrow F^k$ funksiyasi sifatida talqin qilinishi mumkin va u polinom akslantirish deb ataladi.

MQ muammosi F cheklangan maydon bo‘lsin. $p_1, \dots, p_k: F^n \rightarrow F$ ko‘p o‘zgaruvchili kvadratik polinom funksiyalar bo‘lsin. Quyidagi tenglamalar tizimi uchun $s \in F^n$ yechimni topish,

MQ (multivariate quadratic) muammosi deb ataladi [1]:

$$p_1(s) = 0 : p_k(s) = 0$$

Ushbu muammo hisoblash jihatidan qiyin ekanligi isbotlangan.

Ko‘p o‘zgaruvchili imzo sxemalari ochiq kalitli kriptosistemalar (Multivariate public-key cryptosystems, MPKC) polinomial akslantirishlardan ochiq va shaxsiy kalitlarni ifodalash uchun foydalaniladigan konstruksiyalardir. Ammo, MPKC konstruksiyalari asosan raqamli imzo sxemalari sifatida qo‘llaniladi va shifrlash maqsadlari uchun mos emas [4].

F cheklangan maydon bo‘lsin. Berilgan xabar $m \in F$ uchun imzo $s \in F^n$ yaratishning asosiy g‘oyasi P polinomial akslantirishi ostida m obraziga (image) bir yoki bir nechta asl obrazni (pre image) hisoblashdir. Bu quyidagi keltirilgan tenglamalar tizimini echimi s ni topishga teng:

$$\begin{matrix} p_1(s) = m_1 & p_1(s) - m_1 = 0 \\ \vdots & \Leftrightarrow & \vdots \end{matrix} \quad (1)$$

$$p_k(s) = m_k \quad p_k(s) - m_k = 0$$

Bu yerda, $\mathcal{P} = (p_1, \dots, p_k)$ va $m = (m_1, \dots, m_k)$. $\mathcal{P}$ - akslantirish deb ataldi va ochiq kalitni taqdim etadi. MPKC sxemasini ochiq akslantirish ostida asl obrazlarni topishga imkon beradigan tarzda loyihalash mumkin, lekin MQ muammosini to‘g‘ridan-to‘g‘ri hal qilmasdan. Odatda, bu mexanizm $\mathcal{F}: F^n \rightarrow F^k$ polinomial akslantirishini o‘z ichiga oladi, u markaziy akslantirish deb ataladi. $\mathcal{F}$ akslantirishni quyidagi ikki affin akslantirishlarni qo‘llash orqali yashirish mumkin: $\mathcal{S}: F^n \rightarrow F^n$ va $\mathcal{T}: F^k \rightarrow F^k$. Hosil bo‘lgan funksiya $\mathcal{P} = \mathcal{T} \circ \mathcal{F} \circ \mathcal{S}: F^n \rightarrow F^k$ tegishli shaxsiy kalit $(\mathcal{T}, \mathcal{F}, \mathcal{S})$ uchun ochiq kalit sifatida xizmat qiladi. Odatda, markaziy akslantirish F asl obrazlarni samarali hisoblash imkoniyatini talab qiladi. Affin akslantirishlar $\mathcal{S}$ va $\mathcal{T}$ teskarilantiruvchi (invertible) bo‘lishi kerak; shuning uchun ular to‘liq rangga ega bo‘lishi talab etiladi.

MPKC (Ko‘p o‘zgaruvchilik kriptotizimlar)ning asosiy komponenti markaziy akslantirish $\mathcal{F}$ ni loyihalashdir. Shaxsiy kalit $(\mathcal{T}, \mathcal{F}, \mathcal{S})$ haqida oldindan ma‘lumotga ega bo‘lmasdan, hujumchi ochiq akslantirishni tasodifiy polinomial akslantirishdan farqlay olmaydi. Shu sababli, to‘g‘ridan-to‘g‘ri hujumning murakkabligi MQ muammosining qiyinligiga tenglashtiriladi.

Biroq, ushbu tizimning xavfsizlik farazi markaziy akslantirish $\mathcal{F}$ ga qarshi samarali hujumlar ehtimoli tufayli MQ muammosiga qaraganda kuchliroqdir. Ochiq akslantirishga to'g'ridan-to'g'ri hujum qilish o'rniga, MPKCni buzishning muqobil usuli mavjud. G'oya shundan iboratki, markaziy akslantirish $\mathcal{F}$ ni $\mathcal{P}$ ga o'zgartirish uchun zarur bo'lgan ikkita muqobil affin akslantirishlarini topish kerak. Shunday qilib, kriptotizimga mos keluvchi ochiq akslantirish uchun boshqa shaxsy kalitlarni topish orqali hujum amalga oshirilishi mumkin. Bu mazmunda yangi muammo - polinomlar izomorfizmi (Isomorphism of Polynomials, IP) muammosini aniqlashtirish kerak [3].

IP muammosi Agar $\mathcal{P}$, $\mathcal{F}$ - F^n dan F^k ga bo'lgan ikkita polinomial akslantirish bo'lsa va $\mathcal{P} = (p_1, \dots, p_k)$, $\mathcal{F} = (f_1, \dots, f_k)$ deb yozilsa, shunday shartlarda agar $\mathcal{P} = \mathcal{T} \circ \mathcal{F} \circ \mathcal{S}$ shartni qanoatlantiruvchi ikki teskarisiga ega affin akslantirishlar $\mathcal{S}: F^n \rightarrow F^n$ va $\mathcal{T}: F^k \rightarrow F^k$ mavjud bo'lsa, $\mathcal{S}$ va $\mathcal{T}$ ni topish IP muammosi deb atalib, u yetarlicha hisoblash murakkabligiga ega hisoblanadi [2]. IP muammosini yechish MPKCni buzishi mumkin, chunki bu usul orqali maxfiy affini funksiyalarni topish mumkin. Bu esa berilgan ochiq akslantirish va tasodifiy tanlangan markaziy akslantirishga alternativ maxfiy kalitlar topilishiga olib keladi.

Rainbow imzo sxemasi ehtimoliy eng keng tarqalgan ko'p o'zgaruvchili imzo sxemasi bo'lgan Unbalanced Oil and Vinegar (UOV) sxemasi bilan yaqin bog'liq. Rainbowni tushunish uchun, avvalo, UOV ni to'g'ri tushunish taab etiladi.

UOV ning asosiy g'oyasi markaziy akslantirish $\mathcal{F}$ ning o'zgaruvchilar to'plamini ikki o'zaro kesishmaydigan bo'limga ajratishdan iborat bo'lib, bular oil (neft) va vinegar (sirka) o'zgaruvchilar deb ataladi. Eng muhim xususiyat shundaki, $\mathcal{F}$ ning kvadratik polinomlari ikki oil o'zgaruvchisi o'rtasida cross-term (aralash ko'paytuvchilar) bo'lishiga ruxsat bermaydi. UOV umumiy holda ochiq va yopiqkalitlarni tez hisoblashni taklif qiladi hamda sodda strukturasi bilan ajralib turadi. Lekin uning kamchiligi kalitlarni nisbatan katta o'lchamida namoyon bo'ladi [10].

UOV sxemasi MPKC sxemasi sifatida tavsiflanadi, yuqorida tasvirlanganidek, ochiq akslantirish $\mathcal{P} = \mathcal{T} \circ \mathcal{F} \circ \mathcal{S}: F \rightarrow F^k$ va shaxsiy

polinomial akslantirishlari $(\mathcal{T}, \mathcal{F}, \mathcal{S})$ bilan. Bu sxema oil va vinegar o'zgaruvchilarining sonini aniqlovchi o va v butun parametrlar bilan tavsiflanadi. Ushbu parametrlar markaziy akslantirish $\mathcal{F}$ tuzilishini belgilaydi, bu yerda, $k = o + v$ polinomial funksiyalar va $n = o + v$ o'zgaruvchilar mavjud. Markaziy akslantirish $\mathcal{F}: F^n \rightarrow F^k$ o'z navbatida k ta polinom funksiyalar $f_1, \dots, f_k$ dan tashkil topgan. Ular bir rangli shaklga keltiriladi, ya'ni, konstanta va chiziqli hadlar tashlab yuboriladi. U holda har bir f_r quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$f_r = \sum_{i=1}^v \sum_{j=i}^v \alpha_{ij}^{(r)} x_i x_j + \sum_{i=1}^v \sum_{j=v+1}^n \beta_{ij}^{(r)} x_i x_j \quad (2)$$

Bu yerda, $x_1, \dots, x_v$ va $x_{v+1}, \dots, x_n$ mos holda vinegar va oil o'zgaruvchilari. $\mathcal{F}$ markaziy akslantirish $\mathcal{F}$ dan $\alpha_{ij}^{(r)}$, $\beta_{ij}^{(r)}$ koeffitsientlariga tasodifiy qiymatlar tayinlash orqali generatsiya qilinadi [9]. Affin o'zgartirishlar $\mathcal{S}$ va $\mathcal{T}$ ham tasodifiy koeffitsientlarni tayinlash orqali tanlanadi, agar ularning o'zgaruvchilari teskari qiymatga ega bo'lmasa, bu jarayon takrorlanadi. Markaziy akslantirish $\mathcal{F}$ bo'yicha asl obrazlarni hisoblash quyidagicha amalga oshiriladi:

1-qadam: Vinegar o'zgaruvchilarga $x_1, \dots, x_k$ (qizil bilan ajratilgan) tasodifiy qiymatlar tayinlanadi. Bu jarayon vinegar o'zgaruvchilar o'rtasidagi ko'paytma natijasini doimiyga qisqartiradi, shuningdek, oil va vinegar o'zgaruvchilarning ko'paytmasini chiziqli hadga aylantiradi [8]:

$$f_r = \sum_{i=1}^v \sum_{j=i}^v \alpha_{ij}^{(r)} x_i x_j + \sum_{i=1}^v \sum_{j=v+1}^n \beta_{ij}^{(r)} x_i x_j \quad (3)$$

2-qadam: Buning natijasida $n - v = k$ o'zgaruvchi, ya'ni $x_{v+1}, \dots, x_n$ uchun k ta chiziqli tenglamalar sistemasi hosil bo'ladi. Gaus qisqartirishini qo'llash orqali bu sistemani yechib, qolgan oil qiymatlari $x_{v+1}, \dots, x_n$ aniqlanadi. Agar sistema yechimga ega bo'lmasa, vinegar o'zgaruvchilar uchun boshqa tasodifiy qiymatlar tanlash orqali jarayon takrorlanadi.

Yuqorida aytilganidek, bu MPKC konstruksiyasi berilgan ochiq akslantirish $\mathcal{P}$ bo'yicha asl obrazlarni topishni qiyinlashtiradigan tarzda ishlab chiqilgan. Ammo, shaxsiy dekompozitsiya $\mathcal{P} = \mathcal{T} \circ \mathcal{F} \circ \mathcal{S}$ ni bilgan holda asl obrazlarni samarali hisoblash (masalan, imzo

yaratish) mumkin bo'lad.

Rainbow'ning aniq na'munasi quyidagi parametrlar orqali aniqlanadi. Birinchi sath uchun vinegar o'zgaruvchilar soni v_1 . Birinchi va ikkinchi qavatlar uchun oil o'zgaruvchilar soni o_1 va o_2 . Umumiy o'zgaruvchilar soni $n = v_1 + o_1 + o_2$ va tenglamalar soni $k = o_1 + o_2$ formula orqali aniqlanadi. Rainbowsning markaziy akslantirish $\mathcal{F}$ ning natijaviy strukturasi quyidagi ikki sathdan iborat:

1-sath: $\underbrace{x_1, \dots, x_{v_1}}_{\text{vinegar o'zgaruvchilar}}, \underbrace{x_{v_1+1}, \dots, x_{v_1+o_1}}_{\text{oil o'zgaruvchilar}}$

2-sath:

$\underbrace{x_1, \dots, x_{v_1}, x_{v_1+1}, \dots, x_{v_1+o_1}}_{\text{vinegar o'zgaruvchilar}}, \underbrace{x_{v_1+o_1+1}, \dots, x_{v_1+o_1+o_2}}_{\text{oil o'zgaruvchilar}}$

Bu konstruktsiya UOV holatidagi imzo o'lchami va xabar o'lchami o'rtasidagi nisbati $(v + o)/o$ dan ikki sathli Rainbow holatida $(v_1 + o_1 + o_2)/(o_1 + o_2)$ ga yaxshilanadi, chunki, $v_1 < v$. Ya'ni, amalda imzolar nisbatan kichikroq bo'ladi (bu taxminan 26% qisqarishni anglatadi) [7]. Birinchi sathda kerakli koeffitsientlar sonining qisqarishi tufayli, bu xususiyat shuningdek, xususiy kalit hajmini ham kichikroq qiladi. Biroq, so'nggi hujumlar ushbu konstruktsiyani zaif ekanligini ko'rsatdi, bu esa mazkur samaradorlik yutuqlarining yo'qolishiga olib keldi (quyida keltiriladi).

Aniq kalit juftligini yaratish uchun (1-algoritm), quyidagi akslantirishlar tanlab olinadi:

- Shaxsiy markaziy $\mathcal{F}$ akslantirish $k = o_1 + o_2$ ta ko'phad $f_1, \dots, f_k$ dan tashkil topgan bo'lib, ularning har biri quyidagi ko'rinishga ega:

$$f_r = \begin{cases} r \in \{1, \dots, o_1\} \text{ uchun } \sum_{i \in \mathcal{S}} \alpha_{ij}^{(r)} x_i x_j + \sum_{i \in \mathcal{V}_1, j \in \mathcal{O}_1} \beta_{ij}^{(r)} x_i x_j \\ r \in \{o_1 + 1, \dots, o_1 + o_2\} \text{ uchun } \sum_{i \in \mathcal{S}} \gamma_{ij}^{(r)} x_i x_j + \sum_{i \in \mathcal{V}_2, j \in \mathcal{O}_2} \delta_{ij}^{(r)} x_i x_j \end{cases} \quad (4)$$

Birinchi sath, vinegar indeksleri $V_1 = \{1, \dots, v_1\}$, oil indeksleri $O_1 = \{v_1 + 1, \dots, v_1 + o_1\}$, ikkinchi qatlam, vinegar indeksleri $V_2 = V_1 \cup O_1$ va oil indeksleri $O_2 = \{o_1 + 1, \dots, o_1 + o_2\}$. Koeffitsiyent $\alpha_{ij}^{(r)}$, $\beta_{ij}^{(r)}$, $\gamma_{ij}^{(r)}$ va $\delta_{ij}^{(r)}$ lar F maydondan tasodifiy tanlanadi.

- Ikki maxfiy tasodifiy tanlangan teskarisiga ega affina akslantirish: $\mathcal{T}: F \rightarrow F^k$ va $\mathcal{S}: F^n \rightarrow F^n$. Bu akslantirishlarning koeffitsiyentlari F maydondan tasodifiy tanlanadi. Agar akslantirishlar teskarisiga ega bo'lmasa, jarayon qayta amalga oshiriladi.

Ochiq kalit: $\mathcal{P} = \mathcal{T} \circ \mathcal{F} \circ \mathcal{S}: F^n \rightarrow F^k$.

1-algoritm Rainbow Key Generation.

Kirish: Yo'q.

1. $\mathcal{S} \in F^n \rightarrow F^n$ tanlanadi.
2. $\mathcal{F} \in F^n \rightarrow F^k$ tanlanadi.
3. $\mathcal{T} \in F^k \rightarrow F^k$ tanlanadi.
4. $\mathcal{P} = \mathcal{T} \circ \mathcal{F} \circ \mathcal{S} \in F^n \rightarrow F^k$ hisoblanadi.

Chiqish: ochiq kalit $\mathcal{P}$, shaxsiy kalit $sk = (\mathcal{T}, \mathcal{F}, \mathcal{S})$.

Yuqorida tasvirlanganidek, berilgan $m \in \{0,1\}^*$ uzunlikdagi xabar uchun haqiqiy imzo s - bu $\mathcal{P}$ ostida $H(m)$ ning asl obrazi hisoblanadi, ya'ni, $\mathcal{P}(s) = H(m)$ tenglamasi bajariladi, bunda $H: \{0,1\}^* \rightarrow F^k$ mos keluvchi kriptografik xesh funksiyasi. Akslantirishlar $\mathcal{S}$ va $\mathcal{T}$ samarali tarzda teskari hisoblanganligi sababli, ularning ostida asl obrazlarni topish oson. Markaziy akslantirish $\mathcal{F}$ ostida asl obrazlarni topish esa UOV sxemasidagi kabi amalga oshiriladi [10]:

- birinchi sath vinegar o'zgaruvchilarini tasodifiy tanlash, ya'ni $x_1, \dots, x_{v_1}$:

1-sath: $\underbrace{x_1, \dots, x_{v_1}}_{\text{vinegar o'zgaruvchilar}}, \underbrace{x_{v_1+1}, \dots, x_{v_1+o_1}}_{\text{oil o'zgaruvchilar}}$

- birinchi sath oil o'zgaruvchilarining qiymatlarini topish: hosil bo'lgan o_1 ta tenglamalarning chiziqli sistemasi yechib, birinchi sath uchun o_1 ta oil o'zgaruvchilarining aniq qiymatlari hisoblanadi;

- birinchi sathdan olingan qiymatlarni, ya'ni, $x_1, \dots, x_{v_1+o_1}$, ikkinchi sath tenglamalariga qo'llash.

2-sath:

$\underbrace{x_1, \dots, x_{v_1}, x_{v_1+1}, \dots, x_{v_1+o_1}}_{\text{vinegar o'zgaruvchilar}}, \underbrace{x_{v_1+o_1+1}, \dots, x_{v_1+o_1+o_2}}_{\text{oil o'zgaruvchilar}}$

- ikkinchi sathdagi oil o'zgaruvchilarining qiymatlarini topish: hosil bo'lgan o_2 ta tenglamalarning chiziqli sistemasini yechib, ikkinchi sathning qolgan oil o'zgaruvchilarining aniq qiymatlari hisoblanadi;

- tenglama yechimi yo'q bo'lsa: Agar chiziqli tizimlardan biri uchun yechim topilmasa, jarayon birinchi sath vinegar o'zgaruvchilarining boshqa tasodifiy qiymatlarini tanlashdan boshlanadi. Xabar m uchun $\mathcal{P}$ ostida haqiqiy imzoni hisoblash H funksiyasi yordamida xabarni xeshlash va keyin maxfiy akslantirishlar $\mathcal{T}$, $\mathcal{F}$ va $\mathcal{S}$ ostida asl obrazlarni topish orqali amalga oshiriladi (2-algoritm).

2-algoritm Rainbow Signature generation.

Kirish: shaxsiy kalit $sk = (\mathcal{T}, \mathcal{F}, \mathcal{S})$, xabar $m \in \{0, 1\}^*$.

1. $m_H = H(m)$ hisoblanadi.
2. $u = \mathcal{T}^{-1}(m_H)$ hisoblanadi.
3. $\mathcal{F}$ ostida u ning asl obrazi u^{-1} topiladi.
4. $s = \mathcal{S}^{-1}(u^{-1})$ hisoblanadi.

Chiqish: imzo s .

$m \in \{0, 1\}^*$ xabar va $s \in \mathbb{F}^n$ imzo berilgan bo'lsin. Agar $H(m) = \mathcal{P}(s)$ o'rinli bo'lsa, s imzo haqiqiy, aks holda imzo haqiqiy emas (33-algoritm).

3-algoritm Rainbow Verification.

Kirish: ochiq kalit $\mathcal{P}$, xabar $m \in \{0, 1\}^*$, imzo $s \in \mathbb{F}^n$.

1. $m'_H = \mathcal{P}(s)$ hisoblanadi.
2. $m_H = H(m)$ hisoblanadi.

Chiqish: agar $m'_H = m_H$ imzo haqiqiy, aks holda haqiqiy emas.

1-javal

Rainbowning uchinchi raund parametrlari

Parametrlar	$\mathbb{F}$	v_1	o_1	o_2
Level I	GF(16)	36	32	32
Level III	GF(256)	68	32	48
Level V	GF(256)	96	36	64

Natijalar. Bu konstruktsiya UOV holatidagi imzo o'lchami va xabar o'lchami o'rtasidagi $(v + o)/o$ nisbatini ikki sathli Rainbow holatida $(v_1 + o_1 + o_2)/(o_1 + o_2)$ darajasiga yaxshilaydi, chunki $v_1 < v$. Ya'ni, amalda imzolar nisbatan kichikroq bo'ladi (bu taxminan 26% qisqarishni anglatadi) [7]. Birinchi sathda kerakli koeffitsientlar sonining qisqarishi tufayli, bu xususiyat shuningdek, xususiy kalit hajmini ham kichikroq qiladi. Biroq, so'nggi hujumlar ushbu konstruktsiyani zaif ekanligini ko'rsatdi, bu esa mazkur samaradorlik yutuqlarining yo'qolishiga

olib keldi.

Rainbowning uchinchi raundi uchun taklif qilingan parametrlar 2-jadvalda keltirilgan:

Keltirilgan parametrlardan ko'rinib turibdiki, xavfsizlik darajasi oshgan sari (Level I dan Level V gacha) chekli maydon hajmi va o'zgaruvchilar soni ham ortib boradi, bu esa kalit va imzo o'lchamlarining kattalashishiga olib keladi. Shu bilan birga, ikki sathli tuzilma UOV sxemasiga nisbatan kalit va imzo hajmini optimallashtirish imkonini beradi, biroq bu samaradorlik xavfsizlikka nisbatan doimiy tekshiruvni talab qiladi, chunki markaziy akslantirishning maxsus strukturalari potensial kriptotahlil hujumlari uchun qo'shimcha imkoniyatlar yaratishi mumkin.

2-jadval

Rainbow raqamli imzo sxemasining xavfsizlik darajalari bo'yicha asosiy parametrlari

Parametrlar	$\mathbb{F}$	v_1	o_1	o_2
Level I	GF(16)	36	32	32
Level III	GF(256)	68	32	48
Level V	GF(256)	96	36	64

Xulosa. Maqolada ko'p o'zgaruvchili kriptografiyaning matematik asoslari va postkvant kriptografiyadagi o'rni tahlil qilindi. MQ va IP muammolarining hisoblash murakkabligi ko'rib chiqilib, UOV hamda Rainbow raqamli imzo sxemalarining tuzilishi va ishlash prinsiplari o'rganildi. Tahlil natijasida ko'p o'zgaruvchili kriptografiya raqamli imzo sxemalarini yaratishda istiqbolli yo'nalishlardan biri ekanligi aniqlandi. Shu bilan birga, mavjud sxemalarning xavfsizlik va samaradorlik xususiyatlarini chuqur tadqiq etish ularni amaliyotda qo'llash uchun muhim ahamiyatga ega.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Albrecht, M. R., Bernstein, D. J., Chou, T., Cid, C., Gilcher, J., Lange, T., Maram, V., von Maurich, I., Misoczki, R., Niederhagen, R., Paterson, K. G., Persichetti, E., Peters, C., Schwabe, P., Sendrier, N., Szefer, J., Tjhai, C. J., Tomlinson, M., & Wang, W. (2020). Classic McEliece: Conservative code-based cryptography.
- [2] Shor, P. W. (1994). Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring. In Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (pp. 124–134).
- [3] Cryptology ePrint Archive, Report 2020/1343. (2020). International Association for Cryptologic Research.
- [4] Patarin, J. (1996). Hidden fields equations (HFE) and isomorphisms of polynomials. In Advances in Cryptology—EUROCRYPT '96 (pp. 33–48). Springer.

- [5] Kipnis, A., & Shamir, A. (1998). Cryptanalysis of the Oil and Vinegar signature scheme. In Advances in Cryptology—CRYPTO '98 (pp. 257–266). Springer.
- [6] Ding, J., & Schmidt, D. (2005). Rainbow, a new multivariable polynomial signature scheme. In Applied Cryptography and Network Security—ACNS 2005 (pp. 164–175). Springer.
- [7] Kipnis, A., Patarin, J., & Gaborit, P. (1999). Unbalanced Oil and Vinegar signature schemes. In Advances in Cryptology—EUROCRYPT '99 (pp. 206–222). Springer.
- [8] Ding, J., Yang, B.-Y., Chen, C.-H. O., Chen, M.-S., & Cheng, Y. Rainbow signature: A new multivariable polynomial signature scheme. Cryptology ePrint Archive.
- [9] Bernstein, D. J., Buchmann, J., & Dahmen, E. (Eds.). (2009). Post-quantum cryptography. Springer.
- [10] Cartor, R., Cartor, M., Lewis, M., & Smith-Tone, D. (2022). IPRainbow. In Post-Quantum Cryptography: 13th International Conference, PQCrypto 2022. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17234-2_9

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Mustafojev, A. B. (2026). Ko'p o'zgaruvchili kriptografik tizimlar va ularning tahlili. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.13>

UO‘K: 622.831:004.94

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.28

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

KALIYLI KONLARDA QAZIB OLISH CHUQURLIGI ORTISHI BILAN SILVINIT RUDASINI QAZIB OLISH TIZIMIDAGI PARAMETRLARNI GEOMEXANIK MOSLASHTIRISH VA NAZARIY ASOSLASH



**Karimov Yoqub
Latipovich**

Dotsent, texnika fanlari bo'yicha
falsafa doktori (PhD), Qarshi
davlat texnika universiteti, Qarshi,
O'zbekiston
E-mail: karimov_6613@mail.ru
ORCID ID: 0009-0000-7885-5306
Science ID: FQD-0326-0060



**Jumayev Ilhom
Kudratovich**

“Dehqonobod kaliy zavodi” AJ
tog'-kon majmuasi bosh injeneri,
Dehqonobod, O'zbekiston



**Olimov Farusxon
Muzaffar o'g'li**

Dotsent, texnika fanlari bo'yicha
falsafa doktori (PhD), Qarshi
davlat texnika universiteti, Qarshi,
O'zbekiston
E-mail: farusxon@mail.ru
ORCID ID: 0009-0003-3787-3657



**Nomdorov Rustam
Urolovich**

Dotsent, texnika fanlari bo'yicha
falsafa doktori (PhD), Qarshi
davlat texnika universiteti, Qarshi,
O'zbekiston
E-mail: rustamnordorov@mail.ru
ORCID ID: 0009-0000-6987-8995
Science ID: FQD-0425-0028

Annotatsiya. Ushbu maqolada kaliyli konlarda qazib olish chuqurligi ortib borishi sharoitida silvinit rudalarini kamerali qazib olish tizimi parametrlarini geomexanik moslashtirish va nazariy asoslash masalalari Tyubegatan kaliy tuzlari koni misolida tadqiq etilgan. Sanoat qatlamlari va ularni o'rab turgan tog' jinslarining fizik-mexanik xossalari, tabiiy va texnogen kuchlanishlar, tektonik omillar, qatlamlarning yotish chuqurligi va qalinligi hamda yaqin joylashgan qatlamlarni qazib olishning o'zaro ta'siri baholangan. “PRESS 3D URAL” dasturiy majmuasi yordamida tog'-kon ishlari rivojlanishining turli sxemalari uchun kuchlanishlar konsentratsiyasi tahlil qilingan. Qazib olish chuqurligi 500–1000 m oralig'ida o'zgarganda kameralararo seliklarning barqarorligini ta'minlovchi parametrlar geomexanik jihatdan asoslangan. Amaldagi Galurgiya instituti uslubiyati va taklif etilayotgan hisoblash usuli bo'yicha olingan natijalar qiyosiy tahlil qilinib, kameralararo seliklarning minimal ruxsat etilgan kengliklari aniqlangan. Taklif etilgan yondashuv seliklarning 50 yillik me'yoriy xizmat muddatini ta'minlagan holda kameralararo seliklarda qoldiriladigan ruda nobudgarchiligini 15–20% ga kamaytirish imkonini berishi aniqlangan. Olingan natijalar katta chuqurliklarda kaliy rudalarini xavfsiz va samarali qazib olish parametrlarini optimallashtirish uchun ilmiy-amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.
Kalit so'zlar: kaliy koni, silvinit rudasi, Tyubegatan koni, qazib olish chuqurligi, kamerali qazib olish tizimi, kameralararo selik, geomexanika, kon bosimi, kuchlanishlar konsentratsiyasi, tog' jinslari massivi, selik barqarorligi, ruda nobudgarchiligi.

Received: 01.07.2026

Accepted: 10.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ СИЛЬВИНИТОВЫХ РУД ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ГЛУБИНЫ РАЗРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Каримов Ёкуб
Латипович**

Доцент, доктор философии по
техническим наукам (PhD),
Каршинский государственный
технический университет,
Карши, Узбекистан

**Жумаев Илхом
Кудратович**

Главный инженер
горнодобывающего комплекса АО
«Дехканабадский калийный
завод», Дехканабад, Узбекистан

**Олимов Фарухсон
Музаффар угли**

Доцент, доктор философии по
техническим наукам (PhD),
Каршинский государственный
технический университет,
Карши, Узбекистан

**Номдоров Рустам
Уролович**

Доцент, доктор философии по
техническим наукам (PhD),
Каршинский государственный
технический университет,
Карши, Узбекистан

Аннотация. В статье исследованы вопросы геомеханической адаптации и теоретического обоснования параметров камерной системы разработки силвинитовых руд при увеличении глубины ведения горных работ на примере Тюбегатанского месторождения калийных солей. Выполнена оценка физико-механических свойств промышленных пластов и вмещающих пород, естественных и техногенных напряжений, тектонических факторов, глубины и мощности залегания пластов, а также взаимного влияния разработки сближенных пластов. С использованием программного комплекса «PRESS 3D URAL» проанализирована концентрация напряжений при различных схемах развития горных работ. Геомеханически обоснованы параметры межкамерных целиков, обеспечивающие их устойчивость при увеличении глубины разработки от 500 до 1000 м. Проведён сравнительный анализ результатов расчётов по действующей методике института «Галургия» и предлагаемому методу, определены минимально допустимые значения ширины межкамерных целиков. Установлено, что применение предлагаемого подхода позволяет снизить потери руды в межкамерных целиках на 15–20 % при обеспечении их нормативного срока службы 50 лет. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров безопасной и эффективной разработки калийных руд на больших глубинах.

Ключевые слова: калийное месторождение, силвинитовая руда, Тюбегатанское месторождение, глубина разработки, камерная система разработки, межкамерный целик, геомеханика, горное давление, концентрация напряжений, массив горных пород, устойчивость целиков, потери руды.

**GEOMECHANICAL ADAPTATION AND THEORETICAL JUSTIFICATION
OF SYLVINITE ORE MINING SYSTEM PARAMETERS WITH INCREASING
MINING DEPTH IN POTASH DEPOSITS**

**Karimov Yokub
Latipovich**

Associate Professor, Doctor of
Philosophy (PhD) in Technical
Sciences, Karshi State Technical
University, Karshi, Uzbekistan

**Jumaev Ilhom
Kudratovich**

Chief Engineer of the Mining
Complex, JSC “Dehkanabad
Potash Plant”, Dehkanabad,
Uzbekistan

**Olimov Faruskhon
Muzaffar ugli**

Associate Professor, Doctor of
Philosophy (PhD) in Technical
Sciences, Karshi State Technical
University, Karshi, Uzbekistan

**Nomdorov Rustam
Urolovich**

Associate Professor, Doctor of
Philosophy (PhD) in Technical
Sciences, Karshi State Technical
University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. This article investigates the geomechanical adaptation and theoretical justification of room-and-pillar mining system parameters for sylvinitic ores under conditions of increasing mining depth, using the Tyubegatan potash deposit as a case study. The physical and mechanical properties of the productive seams and surrounding rocks, natural and mining-induced stresses, tectonic factors, seam depth and thickness, and the interaction between closely spaced mined seams are evaluated. The “PRESS 3D URAL” software package was used to analyze stress concentration under different mining development schemes. The parameters of inter-chamber pillars required to maintain stability at mining depths ranging from 500 to 1000 m were geomechanically substantiated. The results obtained using the existing methodology of the Galurgiya Institute were compared with those derived from the proposed calculation method, and the minimum permissible widths of inter-chamber pillars were determined. The proposed approach was found to reduce ore losses in inter-chamber pillars by 15–20% while maintaining a design service life of 50 years. The obtained results provide a scientific and practical basis for optimizing the

parameters of safe and efficient potash ore extraction at greater mining depths.

Keywords: potash deposit, sylvinit ore, Tyubegatan deposit, mining depth, room-and-pillar mining system, inter-chamber pillar, geomechanics, mine pressure, stress concentration, rock mass, pillar stability, ore losses.

Kirish. Rudnik loyihasi “Galurgiya” OAJ tomonidan ishlab chiqilgan. Loyihani ishlab chiqishda “Geoproqnoz” MChJ “NPF” tomonidan tayyorlangan “Dehqonobod kaliyli o’g’itlar zavodi konchilik majmuasini loyihalash uchun geologik boshlang’ich ma’lumotlar” va “Galurgiya” OAJ tomonidan tayyorlangan “Tyubegatan kaliy tuzlari konini qazib olishni loyihalash uchun boshlang’ich ma’lumotlar” dan foydalanilgan. Ushbu ishlar Tyubegatan kaliy tuzlari konini qidirish, qo’shimcha qidirish va boshqa tadqiqotlar hisobotlaridagi amaliy ma’lumotlar asosida bajarilgan. Ushbu ishlarda sanoat qatlamining yotishidagi kon-geologik sharoitlar yetarli darajada o’rganilmagani qayd etilgan. Bu silvinit rudalari va ularni o’rab turgan jinslarning fizik-mexanik xossalariga, suvdan himoyalovchi qatlam tuzilishiga, foydali qazilma tanasining morfologiyasiga, qatlamlararo sho’r suvlarning mavjudligiga, Quyi II qatlam ishchi qismining bevosita shipi barqarorligiga va kameralararo seliklarning parametrlarini tanlashda katta ahamiyatga egadir [1-3].

2010-yilda qiya stvollar o’tkazilgan va Quyi II sanoat qatlami ochilgan. O’tilgan lahimlarda geologik tadqiqotlar bajarilgan hamda ularning fizik-mexanik xususiyatlarini aniqlash uchun sanoat qatlamidan va uni o’rab turgan jinslardan na’munalar olingan. Ushbu tadqiqotlar asosida «Galurgiya» OAJ tajriba paneli uchun qazib olish tizimi parametrlarini hisoblab chiqilgan va birinchi navbatda qazib olinadigan butun uchastka uchun 700 m chuqurlikkacha qazib olish tizimi parametrlarining mumkin bo’lgan variantlari bo’yicha tavsiyalar berilgan.

Mazkur olib borilgan ilmiy-tadqiqot ishlari jarayonida olingan natijalar Tyubegatan kaliy tuzlari konining 1000 m chuqurlikkacha, xizmat muddati 50 yil bo’lgan holda qazib olishga nisbatan kameralararo seliklar parametrlarini geomexanik asoslash natijalari keltirilgan.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Jins va ruda namunalari fizik-mexanik xossalarini sinash ma’lumotlari. Qashqadaryo GQE ma’lumotlariga

ko’ra, tuz jinslari namunalarining fizik-mexanik tavsiflarining o’rtacha qiymatlari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Tuz jinslarining fizik-mexanik tavsiflari

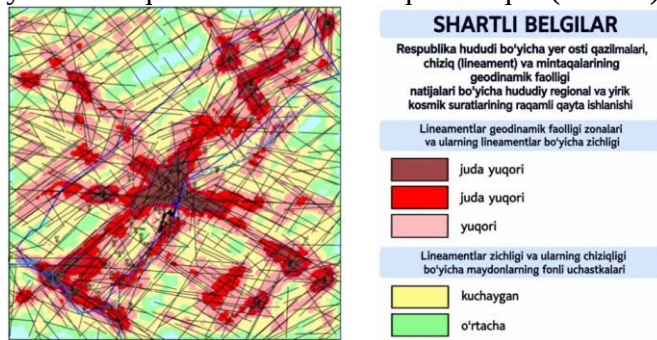
Skvajina raqami	Birligi	Siqishdagi chidamlilik ko’rsatkichi, $\sigma_{сж}$ МПа
BzK-1	O’rtacha	21,59
	Min	5,89
	Max	23,91
BzK-2	O’rtacha	24,80
	Min	21,79
	Max	29,57
BzK-3	O’rtacha	25,74
	Min	22,00
	Max	29,57
BzK-5	O’rtacha	24,68
	Min	20,88
	Max	28,49
BzK-7	O’rtacha	27,35
	Min	16,93
	Max	32,87

Hisoblash uchun yuqorida yotuvchi o’rab turgan jinslarning hajmiy og’irligi $\gamma = 2,5 \text{ t/m}^3$ qabul qilinadi.

Jinslarning strukturaviy zaiflashish koeffitsiyentining hisobiy ko’rsatkichini quyidagicha tanlaymiz. Konning birinchi navbatda qazib olinadigan uchastkasining katta qismida (~ maydonning 75 foizida) qatlamning bevosita shipi yuqori plastiklik va mustahkamlikka ega bo’lgan yaxlit tosh tuzidan tashkil topgan. Bu xususiyat jinslar shipi ochilganda cho’zilish jarayonida yuzaga keladigan yoriqlilikning zararli ta’sirini o’z-o’zidan bartaraf etish hamda birlamchi va ikkilamchi yoriqlarni bitirish imkonini beradi. Shuningdek, bevosita ship yuqori mexanik mustahkamlikka ega bo’lgan qalinligi 0,3 m gacha bo’lgan ikkilamchi angidrit qatlamchasidan tashkil topgan. Hisoblash uchun jinslarning strukturaviy zaiflashish koeffitsiyenti $K_{ср} = 1$ qabul qilinadi.

Jinslarning siqilishga mustahkamlik chegarasining hisobiy qiymatini quyidagicha tanlaymiz. Tog’ jinslarining siqilishdagi mustahkamlik chegarasining tavsiya etiladigan qiymatlari 21,59–27,35 MPa diapazonida o’zgaradi. Hisoblash uchun tuz jinslarining siqilishga mustahkamligi minimal qiymat bo’yicha (eng noqulay sharoitlar) $\sigma_{сж} = 22 \text{ MPa}$ qabul qilinadi.

Kon bosimining tabiiy kuchlanishlar maydonidagi gorizonttal tashkil etuvchisi ta'sirini hisobga oluvchi hisobiy koeffitsiyentni quyidagicha tanlaymiz. Mintaqaviy aerokosmogeologik tadqiqotlar natijalarining tahlili shuni ko'rsatadiki, kon uchastkasida poydevor va cho'kindi qoplamasining taxmin qilinayotgan tektonik buzilishlari asosida yirik chiziqli zonalar bashorat qilinmoqda (1-rasm).



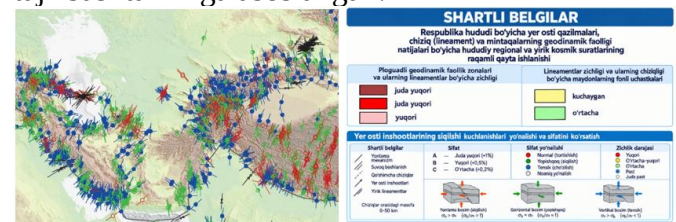
1-rasm. Tyubegatan kaliy tuzlari konining geodinamik faol zonalar xaritasi (Kopylov I.S.).

Kon va unga tutash hududda turli darajadagi 2150 dan ortiq to'g'ri chiziqli tektonik yoriqlar, ustun shimoli-sharqiy va shimoli-g'arbiy yo'nalishlar, shuningdek, yoysimon yoriqlar va halqasimon tuzilmalar ajratilgan. Kaliy rudalarini qazib olish bo'yicha tog'-texnologik ishlar eng yirik — Tuyashsay (Tuyabashsay) geodinamik favqulodda yuqori faol zonasining noqulay sharoitlarida mavjudligi aniqlandi.

Shu bilan birga, kon maydonida massivning tabiiy kuchlanish holatini dala tadqiqotlari o'tkazilmagan. Shuning uchun hozirgi bosqichda uni baholashning yagona imkoniyati Yer po'stining kuchlanish holatini o'rganish bo'yicha xalqaro World Stress Map WSM loyihasi ma'lumotlar bazasidan foydalanishdir. WSM xaritasidan ko'rinadiki, kon hududida seysmologik ma'lumotlarga ko'ra bir qator zilzilalar qayd etilgan. Zilzilaning fokal mexanizmi massivning tabiiy kuchlanish holatini tavsiflaydi. Bu holat tektonik uzilishlarning tashlama-siljishlar va surilma-siljishlar ko'rinishida hosil bo'lish rejimiga mos keladi (2-rasm).

Tyubegatan kaliy tuzlari koni (WSM ma'lumotlari bo'yicha) tashlama-siljishlar va surilma-siljishlarda miqdor jihatidan eng katta kuchlanishlar gorizonttal tektonik kuchlanishlardir. Hisoblash uchun tektonik buzilishlar ta'siridan yuzaga keladigan maksimal gorizonttal

kuchlanishlar $\lambda_T=1,25$ qabul qilinadi. Bu tektonik kuchlanishli zonalarida konlarni o'zlashtirish tajribasi tahliliga asoslangan.



2-rasm. Tabiiy kuchlanish holati xaritasi.

Tuz qatlamlarining hisobiy yotish burchagi va qalinligini quyidagicha tanlaymiz. Qazib olish ishlari natijalariga ko'ra, qatlamlarning yotish burchagi 10 dan 27 gradusgacha o'zgaradi.

Hisoblash uchun kon yotqizig'ining minimal yotish burchagi $\alpha=10^0$ qabul qilinadi (seliklarning ko'ndalang kesimiga tushadigan yuklamalar bo'yicha eng noqulay sharoitlar).

Qazish va kon-tayyorlov ishlari olib boriladigan uchastkada HIIA-HIIB qatlamlararo qatlamining qalinligi 5–9 m ni tashkil etadi, bu HIIA va HIIB silvinit qatlamlarini alohida qazib olish imkonini belgilaydi. Zaxiralarni qazib olish uchun ikki qatlamli qazib olish ko'zda tutilgan – H-IIA qatlami Урал-20P kombayni bilan, H-IIБ qatlami Урал-20P va Урал-10A kombaynlari bilan kamerani yon tomondan qo'shimcha kesib, ikki yurishda qazib olish orqali qazib olinadi. Qazib olinadigan qalinliklar quyidagicha: H-IIA qatlami – 3,1 m, 4,0 m, 5,0 m; H-IIБ qatlami – 2,4 m, 3,1 m.

Qazib olishning hisobiy chuqurligini quyidagicha tanlaymiz. Quyi II silvinit qatlamining yotish chuqurligi 1000 m ni tashkil etadi. Seliklarning parametrlari 1000 m chuqurlikkacha aniqlanadi.

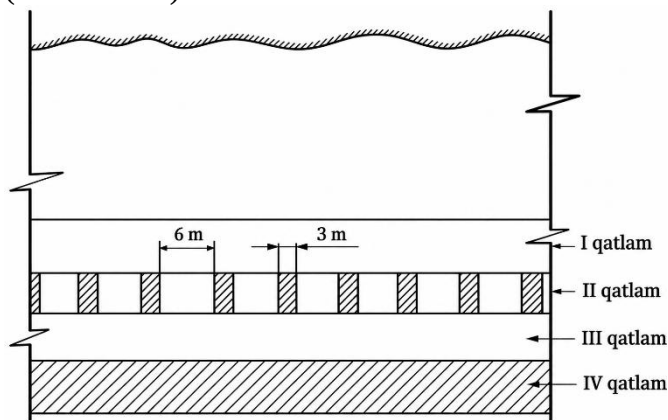
Lahimlarning ko'ndalang kesimi parameterlarini quyidagicha tanlaymiz. Hisoblash uchun quyidagilar qabul qilinadi: lahim kengligi $a = 5,5$ m, lahim balandligi qatlam yotqizig'ining qazib olinadigan qalinligiga teng deb qabul qilinadi.

Konning gidrogeologik sharoitlarini quyidagicha baholaymiz. Tuz qatlamida suvli gorizontlar mavjud bo'lmagani sababli, tuz qatlamining (galit kichik qatlamining) va tuz qatlamining ichidagi suvli gorizontlarning suvga to'yinganligi aniqlanmagan. Quduqlar stvollariga qatlam ichidagi sho'r suvlarning kirib kelishi ham aniqlanmagan. Hisob-kitoblarda suvlanganlik omili

hisobga olinmaydi.

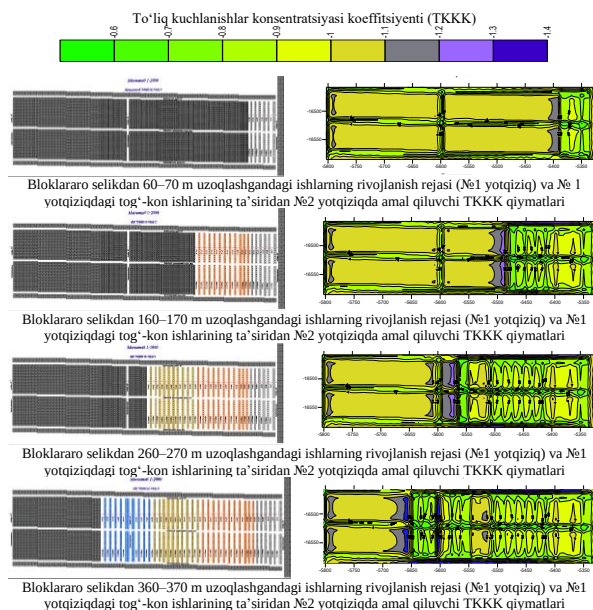
Natijalar. Yaqin joylashgan tuz qatlamlarini qazib olishda texnogen kuchlanishlar maydoni ta'sirini quyidagicha baholaymiz. Yaqin joylashgan qatlamlarning o'zaro ta'sir darajasini baholash uchun bir-biridan 5–6 m masofada joylashgan yaqin qatlamlarni qazib olish sxemasi ko'rib chiqildi (3-rasm).

“PRESS 3D URAL” dasturiy ta'minotidan foydalanib, № 1 ruda tanasida (II pachka) tog'-kon ishlarining rivojlanishining to'rtta hisobiy sxemasi (4-rasm) bo'yicha sonli hisob-kitoblar bajarildi. Natijada №1 ruda tanasidagi (II pachka) tog'-kon ishlarining ta'siridan №2 ruda tanasida (IV pachka) amal qiluvchi kuchlanishlar konsentratsiyasi koeffitsiyentlarining qiymatlari olindi. №2 yotqizig'ining ustidan qazib o'tish ta'sirini batafsil o'rganish, shuningdek, kesim chiziqlari bo'yicha turli kenglikdagi (3 dan 4 m gacha) tasmasimon seliklarning ta'sir darajasini baholash uchun №1 va №2 yotqiziqalarda amal qiluvchi to'liq vertikal siquvchi kuchlanishlar konsentratsiyasi koeffitsiyentlarining taqsimlanish epyuralari qurildi (5–9-rasmlar).



3-rasm. Tog'-kon ishlarining hisobiy sxemasi.

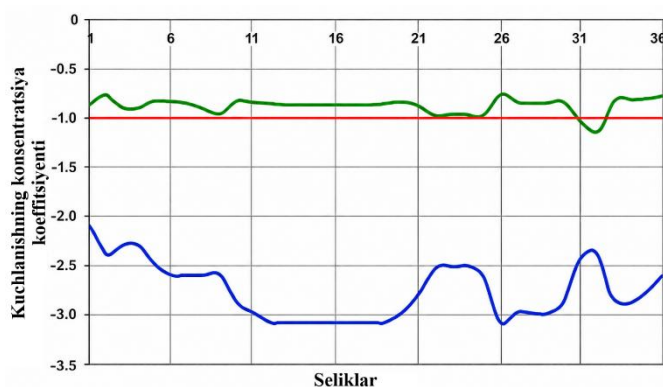
Sonli natijalar asosida №2 kon uyumida kon uyumidagi kon ishlari ta'sirida ta'sir qiluvchi vertikal siquvchi kuchlanishlar konsentratsiyasi koeffitsiyentining o'rtacha qiymati №2 – $\chi_z^{MII}(x, y, z) = -1,5$ deb qabul qilindi. Bunda kengligi 4,0 m dan ortiq bo'lgan seliklar shakllantiriladi.



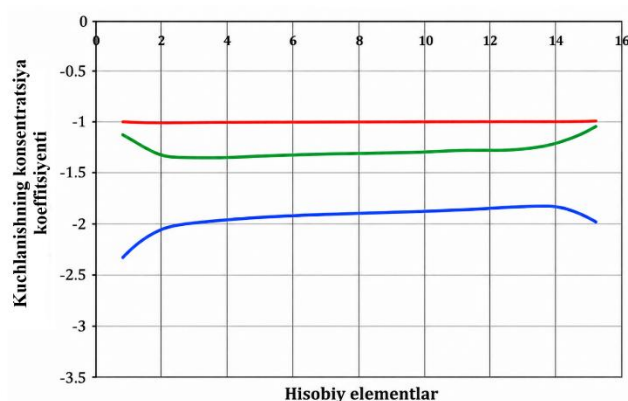
4-rasm. №1 ruda tanasida (II qatlam) tog'-kon ishlarini rivojlantirishning hisobiy sxemalari (qatlam) va №2 ruda tanasidagi (IV qatlam) kuchlanishlarning taqsimlanishi (o'ngda).



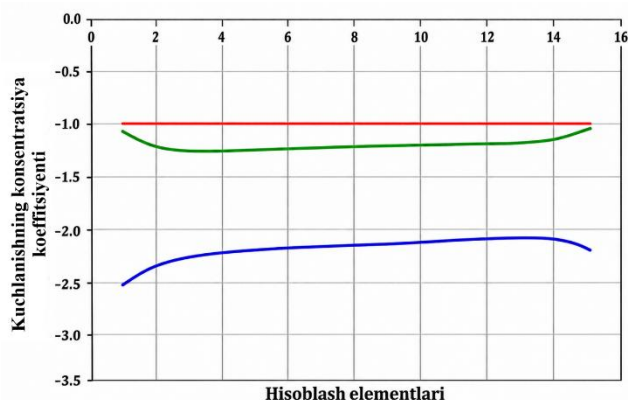
5-rasm. TKKK taqsimlanishi epyuralarini qurish sxemasi.



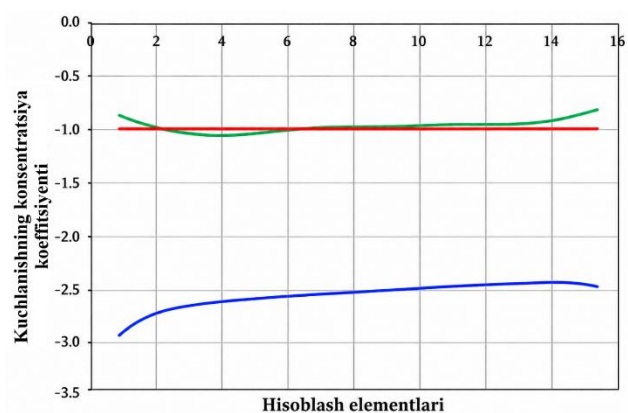
6-rasm. №1, №2 yotqiziqalarda amal qiluvchi TKKK epyuralarining birlashtirilgan grafigi va A-B kesim chizig'i bo'yicha qurilgan tog' jinslari ustuni og'irligidan hosil bo'ladigan kon bosimi.



7-rasm. №1, №2 yotqizqlarda amal qiluvchi TKKK epyuralarining birlashtirilgan grafiklari va $L_q = 4,0 \text{ m}$ bo'lganda C-D kesim chizig'i bo'yicha qurilgan tog' jinslari ustuni og'irligidan hosil bo'ladigan bosim.

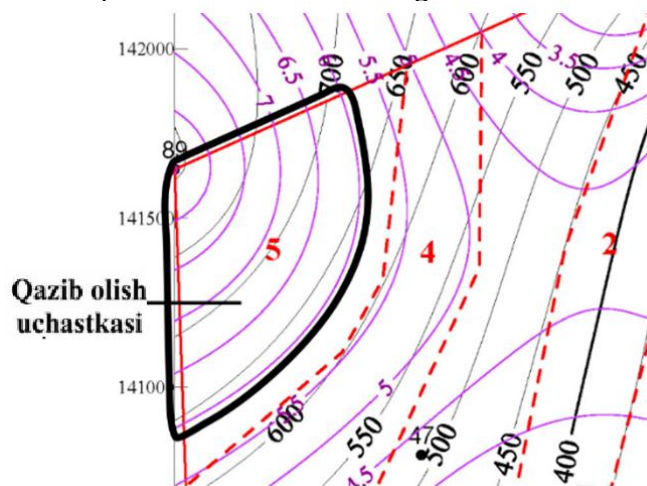


8-rasm. №1 yotqiziqda amal qiluvchi TKKK epyuralarining birlashtirilgan grafiklari. №2 va E-F kesim chizig'i bo'yicha $L_q = 3,5 \text{ m}$ da qurilgan jinslar ustuni og'irligi bosimi.



9-rasm. №1 kon uyumlarida ta'sir qiluvchi KKH epyuralarining birlashtirilgan grafiklari, №2 va G-H kesim chizig'i bo'yicha $L_q = 3,0 \text{ m}$ da qurilgan jinslar ustuni og'irligi bosimi.

Seliklar parametrlarini hisoblash uchun qazib olish uchastkalarining sxemalari va parametrlari. Seliklar parametrlarini hisoblash uchun qazib olish uchastkasining sxemasi.



10-rasm. Seliklar parametrlarini hisoblash uchun qazib olish uchastkasining sxemasi.

Seliklar parametrlarini asoslovchi geomexanik hisob-kitoblar uchun Tyubegatan konining Shimoliy qismidagi zaxiralarni 700 m dan past chuqurlikda yer osti usulida qazib olish sharoitlari uchun quyidagi eng noqulay fizik-mexanik xususiyatlar qabul qilinadi:

- jinslarning hajmiy og'irligi $\gamma = 2,5 \text{ t/m}^3$;
- jinslarning strukturaviy zaiflashish koeffitsiyenti $K_{str} = 1$;
- tuz jinslarining siqilishga mustahkamligi $\sigma_{сж} = 22 \text{ MPa}$;
- jinslarning ilashishi $C = 4,1 \text{ t/m}^2$;
- tektonik tarkibiy qism $\lambda_T = 1,25$;
- kon uyumining yotish burchagi $\alpha = 10^\circ$;
- H-IIA qatlamining qalinligi – 3,1 m, 4,0 m, 5,0 m, H-II6 qatlamining qalinligi – 2,4 m, 3,1 m;
- lahim kengligi $a = 5,5 \text{ m}$ deb qabul qilinadi;
- to'liq kuchlanishlar konsentratsiyasi koeffitsiyenti $\chi_z^{MTI}(x, y, z) = 1,5$ (birinchi qazib olinayotgan qatlamning MKI bosimi ta'sirida tuz qatlamlari qatlamlar majmuasini qazib olishda qo'shni qatlamga ta'siridan);
- uzoq muddatli mustahkamlik koeffitsiyenti $K_{ср} = 0,4$ ($C = 0,4$);
- barqarorlik zaxirasi koeffitsiyenti $K_{zax} = 2,0$.

Galurgiya instituti uslubiyati bo'yicha kameralararo seliklar parametrlarini hisoblashning amaldagi varianti.

Mavjud geologik ma'lumotlar hamda sanoat qatlamlari va ularni o'rab turgan jinslarning mustahkamlik xususiyatlarini aniqlash natijalari shuni ko'rsatadiki, tayyorlov va qazib olish ishlarini olib borish parametrlarini hisoblash uchun Verxnekamsk kaliy tuzlari koni uchun ishlab chiqilgan me'yoriy va uslubiy hujjatlardan foydalanish mumkin [Verxnekamsk kaliy tuzlari koni sharoitida konlarni suv bosishidan himoya qilish va qazib olinayotgan obyektlarni muhofaza qilish bo'yicha ko'rsatmalar (Texnologik reglament), Sankt-Peterburg, 2004; «Verxnekamsk kaliy tuzlari koni sharoitida konlarni suv bosishidan himoya qilish va qazib olinayotgan obyektlarni muhofaza qilish bo'yicha ko'rsatmalar»ga uslubiy tavsiyalar, Sankt-Peterburg, 2004; Tyubegatan kaliy tuzlari konini qazib olish tizimi parametrlarini tuzatish bo'yicha tavsiyalar, «Galurgiya» OAJ, Berezni, 2010; Kaliy konlaridagi qazib olish lahimlarining barqaror oraliqlarini hisoblash bo'yicha tavsiyalar. – L., 1982.].

Qazib olish ishlarini olib borish parametrlarini (kamerali qazib olish tizimini) hisoblashni 2004-yildagi «Ko'rsatmalar...»da keltirilgan metodikaga muvofiq bajarish tavsiya etiladi; unda konni xavfsiz qazib olishning, VZT yaxlitligini saqlashni ta'minlovchi asosiy mezonlari sifatida VZT qatlamlarining egilishi, ya'ni yer yuzasining cho'kishiga teng holat, hamda kameralararo seliklarning yuklanish darajasi qabul qilinadi. Asosiy mezon sifatida VZTning minimal deformatsiyalarini ta'minlaydigan kameralararo seliklarning yo'l qo'yiladigan yuklanish darajasi qabul qilinadi.

Hisob-kitobni kameralararo seliklarning yuklanish darajasining uchta qiymati uchun bajaramiz:

1. Qattiq ($C \leq 0,43$);

2. Seliklarning me'yoriy xizmat muddati uchun (50 yil):

$$\theta = \exp\left(\frac{(1-C)}{\beta}\right)^{\alpha} \quad (1)$$

bu yerda: C – seliklarning yuklanish darajasi; β va α – approksimatsiya parametrlari, silvinit jinsi uchun tavsiya etiladigan qiymatlar $\beta=5,75 \cdot 10^{-2}$; $\alpha=1,0$. $\theta=50$ yil bo'lganda seliklarning yuklanish darajasi $C=0,43$.

Qazib olish tizimi parametrlarini belgilovchi asosiy geologik omillar (yotish chuqurligi H va

sanoat qatlamining qalinligi m).

Kameralararo seliklarning kengligi ularning yo'l qo'yiladigan yuklanish darajasidan kelib chiqib aniqlanadi:

$$C \leq [C] \quad (2)$$

bu yerda: C – kameralararo seliklarning hisobiy yuklanish darajasi; $[C]$ – kameralararo seliklarning yo'l qo'yiladigan yuklanish darajasi, $[C]=0,43$ ga teng deb qabul qilinadi.

Kameralararo seliklarning hisobiy yuklanish darajasi ta'sir etuvchi yukning uning yuk ko'tarish qobiliyatiga nisbatini ifodalaydi va quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$C = \xi \frac{(\gamma \cdot \ell \cdot H_0)}{(B \cdot \sigma_n)} \quad (3)$$

bu yerda: ξ – seliklarga tushadigan yukning o'zgarishini hisobga oluvchi koeffitsiyent; γ – jinslarning hajmiy og'irligi, t/m^3 ; ℓ – o'qlararo masofa, m ; H_0 – ko'rib chiqilayotgan qazib olish uchastkasida yer yuzasidan seliklar shipigacha bo'lgan masofaning maksimal qiymati, m ; B – kameralararo seliklarning hisobiy kengligi, m ; σ_n – jinslarning hisobiy mustahkamligi, t/m^2 .

Kon-texnik omillar ta'siri natijasida seliklarga tushadigan yukning o'zgarishini hisobga oluvchi koeffitsiyent quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$\xi = \xi_0 \cdot \xi_{x_2}, \quad \xi_0 = \xi_1 \cdot \xi_2 \quad (4)$$

bu yerda: ξ_1 – tektonik tarkibiy qism va tuz qatlamining yotish burchagi ($\cos^2 \alpha + \lambda_T \cdot \sin^2 \alpha$) ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsiyent, $\xi_1 \geq 1$; ξ_2 – tayanch bosimi ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsiyent, $\xi_2 \geq 1$; ξ_x – lahimlararo seliklar ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsiyent, $\xi_x \leq 1$.

Tuz uyumidan qo'shimcha yuklanish bilan bog'liq texnogen yuklama ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsiyent hisob-kitobimizda $\xi_1 = 1$ ga teng deb qabul qilinadi.

Qazib olingan bo'shliqning doimiy va uzoq vaqt to'xtatilgan chegaralari bo'yab tayanch bosimi ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsiyent, odatda, jinslar massivining kuchlanganlik holatini aniqlash bo'yicha natural eksperimental tadqiqotlar va tayanch bosimi zonalarining o'lchamlarini belgilash uchun bajariladigan sonli modellashtirish natijalari asosida aniqlanadi.

Qazib olinayotgan qatlamlar sathida ξ_2 koeffitsiyentining qiymati yer yuzasining $\eta_m(t)$ maksimal cho'kish kattaligiga bog'liq holda quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$\xi_2 = 1 + \beta_n \eta_m(t) \quad (5)$$

bu yerda: β_n – empirik koeffitsiyent, eksperimental ma'lumotlar mavjud bo'lmaganda $\beta_n = 0,35$ qiymat qabul qilinadi; $\eta_m(t)$ – yer yuzasining nisbiy maksimal cho'kishi $\eta_m(t) = 0,8$.

Tyubegatan kaliy tuzlari konini qazib olish sharoitlari uchun $\xi_2 = 1,28$.

Lahimlararo seliklar ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsiyent quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$\xi_x = 1 - \chi_c \quad (6)$$

$$\gamma_c = \frac{(n_x)}{(1+n_x)} \left(\frac{B_x}{B} \right)^{\alpha_x} \quad (7)$$

bu yerda: n_x – qazib olish kamerasidagi lahimlararo seliklar soni; B_x – lahimlararo selikning hisobiy kengligi, m; B – kameralararo selikning hisobiy kengligi, m; α_x – approksimatsiya parametri, $\alpha_x = 0,5 \div 1,0$.

Muayyan kon-geologik va kon-texnik sharoitlar uchun α_x parametrining qiymati, odatda, mavjud kuzatuv ma'lumotlarini hisobga olgan holda turli qattqlikdagi seliklarda kuchlanishlar (o'qiy yuklama) taqsimlanishini sonli modellashirish natijalari bo'yicha belgilanadi. Zarur boshlang'ich ma'lumotlar mavjud bo'lmaganda, $\alpha_x = 1$ qiymatidan foydalanishga ruxsat etiladi.

O'qlararo masofa quyidagi ifodadan aniqlanadi:

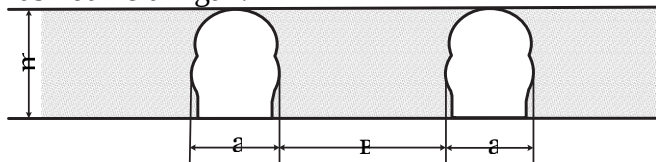
$$l = a_o(1 + n_x) + B_o + n_x B_{xo} \quad (8)$$

bu yerda: a_o , B_o , B_{xo} – kamera tubi sathidagi kamera yo'li, kameralararo selik va yo'llararo selik kengligi.

Yo'llararo seliklar qoldirilmaydigan qatlamlarni qazib olishda kameralar o'qlararo masofasi quyidagi ifodalardan aniqlanadi:

$$\ell = a_o + B_o \quad (9)$$

Sanoat qatlamini qazib olish sxemasi 11-rasmda keltirilgan.



11-rasm. Sanoat qatlamini qazib olish sxemasi.

Tog' jinslarining hisobiy mustahkamligi quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$\sigma_n = k_f \times \sigma_m \quad (10)$$

bu yerda: k_f – seliklarning hisobiy kengligi (b)ning ularning hisobiy balandligiga (m)

nisbatining ta'sirini tavsiflovchi koeffitsiyent; σ_m – massivdagi tog' jinslarining agregat mustahkamligi.

k_f koeffitsiyenti $\lambda_m = B/m$ parametr qiymatiga bog'liq holda quyidagi ifodalardan aniqlanadi:

- $0 < \lambda_m \leq 0,5$ bo'lganda:

$$k_f = \sqrt{2 \times \lambda_m} \quad (11)$$

- $\lambda_m \geq 0,5$ bo'lganda:

$$k_f = \beta_o \times (1 + \beta_m \times \lambda_m) \quad (12)$$

bu yerda: β_o , β_m – approksimatsiya parametrlari, $\beta_o = 1/1,53 \approx 0,654$; $\beta_m = 1,06$.

Massivdagi tog' jinslarining agregat mustahkamligi quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$\sigma_m = k_o \times \sigma_o \quad k_o = k_m \times k_c \times k_l \quad (13)$$

bu yerda: k_m – masshtab omilining ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsiyent, $k_m \geq 1$; k_c – gilli qatlamchalarning ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsiyent, $k_c \leq 1$; k_l – seliklarni kesib o'tishning ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsiyent, $k_l \geq 1$; σ_o – seliklarni tashkil etuvchi tog' jinslarining ekvivalent (keltirilgan) mustahkamligi.

Masshtab omilining ta'sirini hisobga oluvchi k_m koeffitsiyenti – 1,12.

Gilli qatlamchalarning ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsiyent bizning hisob-kitobimizda 1,0 ga teng deb qabul qilinadi.

Lentali seliklarni kesib o'tishning ta'sirini hisobga oluvchi koeffitsiyent $\lambda_c = \ell c/B$ nisbatga bog'liq holda quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$k_l = \begin{cases} 1 + \beta_l \sqrt{\lambda_c - 1} \\ 1,25 \end{cases} \text{ bunda } \begin{cases} 1 \leq \lambda_c < 5 \\ \lambda_c \geq 5 \end{cases} \quad (14)$$

bu yerda: λ_c – seliklar uzunligi yoki ushbu seliklarda o'tilgan kameralar bilan tutashtiruvchi lahimlar orasidagi masofa; β_l – approksimatsiya parametri, $\beta_l = 1,25$.

Galurgiya instituti uslubi bo'yicha hisoblangan kameralararo seliklarning ruxsat etilgan parametrlari. Kameralararo seliklarning hisobiy parametrlari 2-jadvalda keltirilgan [2, 3, 5, 7-10].

2-jadval

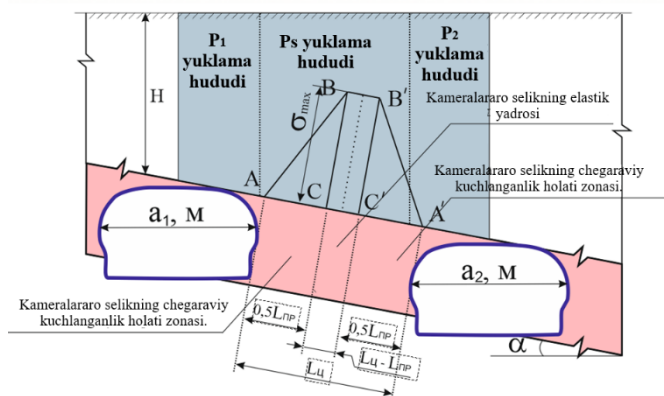
Ikki qatlamli qazib olish – Урал-20P kombayni bilan H-IIA qatlami, Урал-10A kombayni bilan H-IIб qatlami.

Zona raqami	Qazib olish tizimi varianti	Qatlam yotish chuqurligi, m	Qatlam qalinligi, m	Kamera kengligi, m	Kameralararo selik kengligi, m	Kameralarning o'qlararo masofasi, m	Nobudgarchilik, %
3	H-IIA qatlam	500	3,1	5,5	8,5	14,0	60,7
	H-IIб (Урал-20P)	500	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	500	2,4	5,5			
3	H-IIA qatlami	500	4,0	5,5	10,0	15,5	64,5
	H-IIб (Урал-20P)	500	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	500	2,4	5,5			
3	H-IIA qatlami	500	5,0	5,5	11,5	17,0	67,6
	H-IIб (Урал-20P)	500	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	500	2,4	5,5			
4	H-IIA qatlam	600	3,1	5,5	10,0	15,5	64,5
	H-IIб (Урал-20P)	600	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	600	2,4	5,5			
4	H-IIA qatlam	600	4,0	5,5	11,5	17,0	67,6
	H-IIб (Урал-20P)	600	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	600	2,4	5,5			
4	H-IIA qatlam	600	5,0	5,5	13,5	19,0	71,1
	H-IIб (Урал-20P)	600	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	600	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlami	700	3,1	5,5	11,0	16,5	66,7
	H-IIб (Урал-20P)	700	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	700	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlami	700	4,0	5,5	13,5	19,0	71,1
	H-IIб (Урал-20P)	700	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	700	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	700	5,0	5,5	16,0	21,5	74,4
	H-IIб (Урал-20P)	700	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	700	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	800	3,1	5,5	12,5	18,0	69,4
	H-IIб (Урал-20P)	800	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	800	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	800	4,0	5,5	15,5	21,0	73,8
	H-IIб (Урал-20P)	800	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	800	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlami	800	5,0	5,5	18,0	23,5	76,6
	H-IIб (Урал-20P)	800	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	800	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlami	9 00	3,1	5,5	14,0	19,5	71,7
	H-IIб (Урал-20P)	9 00	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	9 00	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	9 00	4,0	5,5	17,0	22,5	75,6
	H-IIб (Урал-20P)	9 00	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	9 00	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	9 00	5,0	5,5	20,0	25,5	78,4
	H-IIб (Урал-20P)	9 00	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	9 00	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	10 00	3,1	5,5	15,5	21,0	73,8
	H-IIб (Урал-20P)	10 00	3,1	5,5			
	H-IIб (Урал-10A)*	10 00	2,4	5,5			

5	H-IIA qatlam	10 00	4,0	5,5	19,0	24,5	77,6
	H-II6 (Урал-20P)	10 00	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	10 00	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	10 00	5,0	5,5	22,5	28,0	80,4
	H-II6 (Урал-20P)	10 00	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	10 00	2,4	5,5			

Yon kesmali kamerani ikki yurishda qazib olish.

Taklif etilayotgan variant bo'yicha kameralararo seliklar parametrlarini hisoblash. Ishlangan bo'shliqda qoldirilgan kameralararo selikning yuklanish sxemasidan kelib chiqib (12-rasm), uning uzunlik birligiga tushadigan to'liq yuk ishlangan bo'shliqlar hosil bo'lishi natijasida selik ustida osilib qolgan qulamagan jinslar og'irligi va bevosita selik ustida joylashgan jins ustunining og'irligidan tashkil topadi. $P_s P_s' P_s''$



12-rasm. To'siq seliklar parametrlarini hisoblash sxemasi.

To'liq yukni aniqlash ifodasi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi: P_s

$$P_s = P_s' + P_s'' \quad (15)$$

“a” ishlangan bo'shliqlar hosil bo'lishi natijasida jinslar og'irligi kameralararo selikka qayta taqsimlanadi va quyidagicha aniqlanadi: P_s'

$$P_s' = P_1 + P_2 \quad (16)$$

bu yerda: P_1 -yuqoridagi ishlangan bo'shliq – a_1 tomonidan kameralararo selikka tushadigan jinslar og'irligi, t; P_2 - pastdagi ishlangan bo'shliq – a_2 tomonidan kameralararo selikka tushadigan jinslar og'irligi, t.

(16) bog'liqlikka kiruvchi va kattaliklarni quyidagi ifodalardan aniqlash mumkin: $P_1 P_2$

$$P_1 = k_a \times \gamma \times H' \times \frac{a_1}{2}, \quad (17)$$

$$P_2 = k_a \times \gamma \times H' \times \frac{a_2}{2}, \quad (18)$$

bu yerda k_a - ishlangan bo'shliqning og'ish va cho'zilish yo'nalishlaridagi chiziqli o'lchamlari nisbatini hisobga oluvchi koeffitsiyent, $k_a \in [0,7; 1,0]$, H' - ruda uyumining yotish burchagi va tektonik tashkil etuvchini hisobga olgan holda kon ishlarini olib borish chuqurligi; α λ_T , a_1 - yuqoridagi ishlangan bo'shliqning o'lchami, m; a_2 - pastdagi ishlangan bo'shliqning o'lchami, m [10].

Koeffitsiyentni quyidagi bog'liqlikdan aniqlash mumkin: k_a

$$k_a = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{a}{b}}}, \quad (19)$$

bu yerda a - ruda uyumining og'ish yo'nalishidagi ishlangan bo'shliq o'lchami, m; b - panel kengligi, m.

(17) va (18) ifodalarga kiruvchi parametr, H'
 $H' = (\cos^2 \alpha + \lambda_T \times \sin^2 \alpha) \times H,$ (20)

bu yerda α - ruda uyumining yotish burchagi, grad.; $\lambda_T = \frac{\sigma_r}{\sigma_B}$ Buzilmagan massivning gorizonta kuchlanishlarining vertikal kuchlanishlarga nisbati $\sigma_r \sigma_B$.

(19) va (20) ni hisobga olgan holda quyidagiga ega bo'lamiz:

$$P_1 = \frac{a_1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{a_1}{b}}} (\cos^2 \alpha + \lambda_T \times \sin^2 \alpha) \times \gamma \times H, \quad (21)$$

$$P_2 = \frac{a_2}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{a_2}{b}}} (\cos^2 \alpha + \lambda_T \times \sin^2 \alpha) \times \gamma \times H \quad (22)$$

(21) va (22) ni hisobga olgan holda, tog' jinslari og'irligi qiymatini aniqlash uchun (16) ifoda quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi: P_s'

$$P_s' = \frac{\sqrt{b}}{2} (\cos^2 \alpha + \lambda_T \times \sin^2 \alpha) \times \gamma \times H \times \left(\frac{a_1}{\sqrt{b+a_1}} + \frac{a_2}{\sqrt{b+a_2}} \right) \quad (23)$$

Bevosita kameralararo selik ustida joylashgan tog' jinslari ustunining og'irligi, P_s'' .

$$P_s'' = P_{L1} = \gamma \times H \times L_{L1} \quad (24)$$

(23) va (24) ni hisobga olgan holda, tog' jinslarining umumiy og'irligi qiymati P_s ni aniqlash uchun (15) ifoda quyidagi yakuniy ko'rinishga ega bo'ladi:

$$P_s = \frac{\sqrt{b}}{2} (\cos^2 \alpha + \lambda_T \times \sin^2 \alpha) \times \gamma \times H \times \left(\frac{a_1}{\sqrt{b+a_1}} + \frac{a_2}{\sqrt{b+a_2}} \right) + \gamma \times H \times L_{II} \quad (25)$$

Shu bilan birga, 12-rasmda keltirilgan sxemadan ko'rinib turganidek, kameralararo selik uzunligining bir birligiga to'g'ri keladigan yuklama P_s ABB'A' shaklda joylashgan tog' jinslarining og'irligi bilan aniqlanadi. Unda ham P_s quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$P_s = S_{\Delta, ABC} + S_{\Delta, A'B'C'} + S_{\Delta, CBB'C'}. \quad (26)$$

12-rasmda keltirilgan sxemani ko'rib chiqishdan quyidagilar kelib chiqadi:

$$S_{\Delta, ABC} = S_{\Delta, A'B'C'} = 0,5 \times (0,5 \times L_{II}) \times \sigma_{max}, \quad (27)$$

$$S_{\Delta, CBB'C'} = (L_{II} - L_{III}) \times \sigma_{max} \quad (28)$$

(26) ifodani (27) va (28) ni hisobga olgan holda o'zgartirib, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$P_s = (L_{II} - 0,5 \times L_{III}) \times \sigma_{max} \quad (29)$$

Bunda L_{III} - chegaraviy kuchlangan selikning kengligi, m; σ_{max} - kameralararo selikda ta'sir qiluvchi maksimal kuchlanish, MPa.

Maksimal kuchlanish σ_{max} qiymati Prandtl yechimidan aniqlanadi:

$$\sigma_{max} = \tau' \times \frac{L_{III}}{m} \quad (30)$$

Bunda τ' - selik va uni o'rab turgan tog' jinslari orasidagi kontaktning oralig'idagi urinma kuchlanishlarning o'rtacha qiymati, MPa. $[0, \sigma_{max}]$

Urinma kuchlanishlar τ' qiymatini quyidagi bog'liqlikdan aniqlash mumkin:

$$\tau' = 0,5 \times (\tau + 0,5 \times \sigma_{сж}) \quad (31)$$

bunda τ - vertikal kuchlanishga teng bo'lganda, Kulon-Mor kontakt mustahkamligi pasportidan olinadigan urinma kuchlanishlar qiymati, MPa. σ_{max} , $\sigma_{сж}$ - uzoq muddatli mustahkamlik koeffitsiyenti 0,4 ni hisobga olgan holda ruda siqilishidagi mustahkamlik chegarasi, MPa [8].

Qiya to'g'ri chiziq kesmasi ko'rinishida qabul qilinadigan Kulon-Mor kontakt mustahkamligi pasportining tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$\tau = C + \operatorname{tg}(\rho) \times \sigma_{max} \quad (32)$$

bunda C - tog' jinslarining ilashishi, MPa; ρ - ruda materiali ichki ishqalanish burchagi, grad.

(32) ifodaning o'ng qismini (31) ifodaga, so'ngra (30) ga qo'yib, kameralararo selikdagi maksimal kuchlanish qiymati σ_{max} ni aniqlash

uchun quyidagi ifodaga ega bo'lamiz:

$$\sigma_{max} = \frac{0,5 \times C + 0,25 \times \sigma_{сж}}{\frac{m}{L_{III}} - 0,5 \times \operatorname{tg}(\rho)} \quad (33)$$

(33) ni hisobga olgan holda, kameralararo selik qabul qiladigan yuklama P_s quyidagi bog'liqlikdan aniqlanadi:

$$P_s = (L_{II} - 0,5 \times L_{III}) \times \frac{0,5 \times C + 0,25 \times \sigma_{сж}}{\frac{m}{L_{III}} - 0,5 \times \operatorname{tg}(\rho)} \quad (34)$$

(34) ifoda ikkita noma'lum parametr L_{II} L_{III} ni o'z ichiga oladi, shuning uchun uni amalga oshirish uchun quyidagi qo'shimcha munosabatni kiritish zarur:

$$k_3 = \frac{S_{\Delta, ABC} + S_{\Delta, A'B'C'} + S_{\Delta, CBB'C'}}{S_{\Delta, ABC} + S_{\Delta, A'B'C'}} = 1 + \frac{S_{\Delta, CBB'C'}}{S_{\Delta, ABC} + S_{\Delta, A'B'C'}} \quad (35)$$

Bunda k_3 - kameralararo selik barqarorligi zaxirasi koeffitsiyenti.

(35) ifodani o'zgartirib, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$k_3 = 2 \times \frac{L_{II}}{L_{III}} - 1 \quad (36)$$

(36) ifodani L_{III} parametrga nisbatan yechib, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$L_{III} = \frac{2 \times L_{II}}{k_3 + 1} \quad (37)$$

(37) ifodasini hisobga olgan holda, kameralararo selik qabul qiladigan yuk P_s quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi

$$P_s = (L_{II} - \frac{L_{II}}{k_3 + 1}) \times \frac{C \times L_{II} + 0,5 \times \sigma_{сж} \times L_{II}}{m \times (k_3 + 1) - L_{II} \times \operatorname{tg}(\rho)} \quad (38)$$

(25) va (38) ifodalarining o'ng qismlarini tenglashtirib, quyidagi kvadrat tenglamani olamiz:

$$A \times L_{II}^2 + B \times L_{II} - C = 0 \quad (39)$$

bu yerda A, B va C - quyidagi ifodalardan aniqlanadigan parametrlar.

$$A = F_2 \times F_3 + \gamma \times H \times F_4 \quad (40)$$

$$B = F_1 \times F_4 - \gamma \times H \times F_5; \quad (41)$$

$$C = -F_1 \times F_5; \quad (42)$$

$$F_1 = \frac{\sqrt{b}}{2} \left(\frac{a_1}{\sqrt{b+a_1}} + \frac{a_2}{\sqrt{b+a_2}} \right) (\cos^2 \alpha + \lambda_T \times \sin^2 \alpha) \times \gamma \times H; \quad (43)$$

$$F_2 = 1 - \frac{1}{k_3 + 1}; \quad (44)$$

$$F_3 = C + 0,5 \times \sigma_{сж}; \quad (45)$$

$$F_4 = -\operatorname{tg}(\rho); \quad (46)$$

$$F_5 = m \times (k_3 + 1). \quad (47)$$

(39) dan kameralararo selikning minimal ruxsat etilgan kengligini aniqlash uchun quyidagi ifodani olamiz:

$$L_{\text{II}} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \times A \times C}}{2 \times A} \quad (48)$$

Shu bilan birga, qurilayotgan konlardagi ko'p yillik model va natural tadqiqotlar natijalari, shuningdek, ushbu konlarda o'tilgan kon lahimlari va kameralaridan foydalanish tajribasi shuni ko'rsatadiki, tog' jinslarida lahimlar atrofida kuchlanishlarning qayta taqsimlanishi va konsentratsiyasi, shuningdek, lahim o'tishda qazish kombaynlarining ta'siri natijasida buzilgan (zaiflashgan) zona hosil bo'ladi. Buzilgan zonaning rivojlanishi, odatda, lahimlar ochilgandan keyingi dastlabki haftalar davomida sodir bo'ladi.

Buzilgan zonaning kattaligi muhandislik-geologik sharoitlarga, lahimlarning o'lchamlari va konfiguratsiyasiga hamda ularning yer yuzasiga nisbatan yotish chuqurligiga bog'liq. Dastlabki hisob-kitoblar uchun kameralararo selikdagi buzilgan zonaning kattaligi kon ishlarining chuqurligiga qarab quyidagi formula bo'yicha aniqlanishi mumkin:

$$h_H = 0,25 \times K_H \times \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (49)$$

bu yerda K_H - lahimning yotish chuqurligiga bog'liq tuzatish koeffitsiyenti. 3-jadvalga muvofiq qabul qilinadi [9-10].

3-jadval

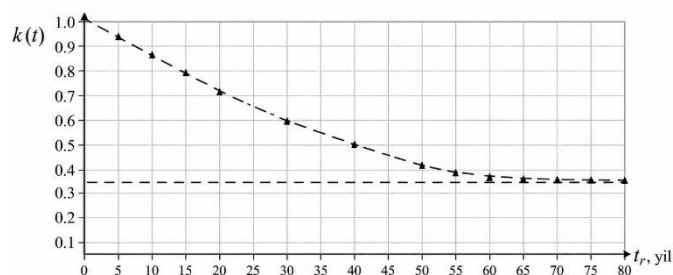
Tuzatish koeffitsiyenti K_H va h_H ning qazish chuqurligiga bog'liqligi

Qazish chuqurligi H, m	K_H	h_H , m
500	1,5	2,0
600	1,6	2,2
700	1,7	2,4
800	1,8	2,6
900	1,9	2,8
1000	2,0	3,0

Kameralararo selikning minimal ruxsat etilgan kengligini aniqlash uchun yakuniy ifoda:

$$L_{\text{II,МКЦ}} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \times A \times C}}{2 \times A} + h_H \quad (50)$$

Muhokama. Taklif etilayotgan variant bo'yicha hisoblangan kameralararo seliklarning ruxsat etilgan parametrlari. Kameralararo seliklarning yuklanish darajasi vaqt o'tishi bilan qanday o'zgarishini baholash uchun uzoq muddatli mustahkamlik egri chizig'ini qurish zarur. Verxnekamsk kaliy tuzlari konida kameralararo selikning yuk ko'tarish qobiliyati bo'yicha o'tkazilgan modellastirish va kuzatuv ma'lumotlari natijalari shuni ko'rsatadiki, 50 yilga teng me'yoriy xizmat muddati hisob-kitoblarda kameralararo seliklarning uzoq muddatli mustahkamlik koeffitsiyenti 0,4 ga teng qilib qo'llanganda (13-rasm), ya'ni yuklanish darajasi $C = 0,4$ bo'lgan kameralararo selik uchun ta'minlanadi.



13-rasm – Kameralararo seliklarning uzoq muddatli mustahkamlik koeffitsiyenti grafifi.

Xizmat muddati 50 yil bo'lgan kameralararo seliklarning hisobiy parametrlari 4-jadvalda keltirilgan.

4-jadval

Ikki qatlamli qazib olish — H-IIA qatlami Урал-20P kombayni bilan, H-II6 qatlami Урал-10A kombayni bilan qazib olishda kameralararo seliklar va nobudgarchilik miqdorlari

Maydon raqami	Qazib olish tizimi varianti	Qatlamning yotish chuqurligi, m	Qatlam qalinligi, m	Kamera kengligi, m	Kameralararo selik kengligi, m	Kameralar o'qlari orasidagi masofa, m	Nobudgarchilik %
3	H-IIA qatlami	500	3,1	5,5	6,0	11,5	52,2
	H-II6 (Урал-20P)	500	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	500	2,4	5,5			
3	H-IIA qatlami	500	4,0	5,5	7,0	12,5	56,0
	H-II6 (Урал-20P)	500	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	500	2,4	5,5			
3	H-IIA qatlami	500	5,0	5,5	8,0	13,5	59,3
	H-II6 (Урал-20P)	500	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	500	2,4	5,5			

4	H-IIA qatlami	600	3,1	5,5	6,0	11,5	52,2
	H-II6 (Урал-20P)	600	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	600	2,4	5,5			
4	H-IIA qatlami	600	4,0	5,5	7,0	12,5	56,0
	H-II6 (Урал-20P)	600	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	600	2,4	5,5			
4	H-IIA qatlam	600	5,0	5,5	8,5	14,0	60,7
	H-II6 (Урал-20P)	600	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	600	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	700	3,1	5,5	6,5	12,0	54,2
	H-II6 (Урал-20P)	700	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	700	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlami	700	4,0	5,5	7,5	13,0	57,7
	H-II6 (Урал-20P)	700	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	700	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlami	700	5,0	5,5	8,5	14,0	60,7
	H-II6 (Урал-20P)	700	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	700	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlami	800	3,1	5,5	6,5	12,0	54,2
	H-II6 (Урал-20P)	800	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	800	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	800	4,0	5,5	7,5	13,0	57,7
	H-II6 (Урал-20P)	800	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	800	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	800	5,0	5,5	9,0	14,5	62,1
	H-II6 (Урал-20P)	800	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	800	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	900	3,1	5,5	7,0	12,5	56,0
	H-II6 (Урал-20P)	900	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	900	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	900	4,0	5,5	8,0	13,5	59,3
	H-II6 (Урал-20P)	900	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	900	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	900	5,0	5,5	9,0	14,5	62,1
	H-II6 (Урал-20P)	900	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	900	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	1000	3,1	5,5	7,0	12,5	56,0
	H-II6 (Урал-20P)	1000	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	1000	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	1000	4,0	5,5	8,0	13,5	59,3
	H-II6 (Урал-20P)	1000	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	1000	2,4	5,5			
5	H-IIA qatlam	1000	5,0	5,5	9,5	15,0	63,3
	H-II6 (Урал-20P)	1000	3,1	5,5			
	H-II6 (Урал-10A)*	1000	2,4	5,5			

* Yon kesmali kamerani ikki yurishda qazib olish

Xulosa.

1. Sanoat qatlamlari va ularni o'rab turgan jinslarning fizik-mexanik xususiyatlari, mintaqaning geodinamik faolligi, qatlamlar majmuasini

qazib olishning o'zaro ta'siri va geomekanik hisob-kitoblarda asosida Tyubegatan kaliy tuzlari konining ruda zaxiralarini qazib olishda kon ishlarining xavfsizligini hamda kaliy konlarini suv bosishdan

himoya qilishni ta'minlaydigan kameralararo seliklar parametrlarini tanlash bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqildi.

2. Galurgiya va taklif etilayotgan usullari bo'yicha mustaqil ravishda bajarilgan kameralararo seliklar parametrlarining hisob-kitoblari natijalari taklif etilayotgan usulda kameralararo seliklarning yuk ko'tarish qobiliyatining qo'shimcha zaxirasini hisobga oluvchi innovatsion usuli qo'llanilgan.

3. Taklif etilayotgan usulga o'tish kameralararo seliklarda ruda yo'qotilishini 15–20 % ga kamaytiradi, shu bilan birga ularning 50 yil xizmat qilish muddatini ta'minlash imkonini beradi.

Bu katta chuqurliklarda plastik kaliy tuzlarini qazib olishning kamerali tizimini qo'llash sohasini sezilarli darajada kengaytiradi va natijada "Dehqonobod kaliy zavodi" AJ tog'-kon majmuasi konlarining resurslar bilan ta'minlanganligini oshiradi.

4. Mazkur olib borilgan ilmiy-tadqiqot ishlari jarayonida olingan natijalar Tyubegatan kaliy tuzlari konining 1000 m chuqurlikkacha, xizmat muddati 50 yil bo'lgan holda qazib olishga nisbatan kameralararo seliklar parametrlarini geomekanik asoslash natijalari keltirilgan.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Misliboev, I. T., & Umarov, F. Y. (2020). Yer osti kon ishlari texnologiyasi. Yoshlar nashriyot uyi.
- [2] Sagatov, N. X. (2013). Qatlamli konlarni yer osti usulida qazib olish. Faylasuflar nashriyoti.
- [3] Агошков, М. И., и др. (1965). Новая технология и системы подземной разработки рудных месторождений. Наука.
- [4] Агошков, М. И., Борисов, С. С., & Боярский, В. А. (1983). Разработка рудных и нерудных месторождений. Недра.
- [5] Именитов, В. Р. (1973). Технология, механизация и организация производственных процессов при подземной разработке рудных месторождений. Недра.
- [6] Karimov, Y. L., Latipov, Z. Y., Xo'jaqulov, A. M., & Boyburodov, N. A. (2023). Kaliy rudalarini qazib olish va qayta ishlash. Qarshi.
- [7] Raximov, V. R., & Ubaydullayev, N. U. (2009). Shaxta va rudniklarni loyihalash asoslari. Toshkent.
- [8] Калийные соли Беларуси: состояние, освоение месторождений, перспективы развития, проблемы. (1999). Материалы международной научно-практической конференции. БелНИГИ.
- [9] ООО «ЗУМК-Инжиниринг». (2008). Горнодобывающий комплекс Дехканабадского завода калийных удобрений на базе Тюбегатанского месторождения калийных солей: Том 3. Горно-механическая часть. Книга 4. Проект горного отвода. Пояснительная записка и чертежи (12.171-ПЗ-ГО). Пермь.
- [10] ОАО «Галургия». (2008). Проект: Горно-добывающий комплекс Дехканабадского завода калийных удобрений. Том 3. Технология горных работ. Пермь.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Karimov, Y. L., Jumayev, I. K., Olimov, F. M., & Nomdorov, R. U. (2026). Kaliyli konlarda qazib olish chuqurligi ortishi bilan silvinit rudasini qazib olish tizimidagi parametrlarni geomekanik moslashtirish va nazariy asoslash. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.28>

УДК: 621.019

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.23

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ЧЕРЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ



Абдуллаева Самира Афган кызы

Кандидат технических наук, Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики; преподаватель кафедры «Механическая инженерия», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (АГУНП), Азербайджан

E-mail: samira.afgan@yandex.ru

ORCID ID: 0000-0002-8362-0891



Джаббаров Тахир Гаффар оглы

Доктор технических наук, профессор кафедры «Механическая инженерия», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (АГУНП), Азербайджан

E-mail: tahir.cabbarov@asoju.edu.az

ORCID ID: 0000-0002-5922-8785

Аннотация. В статье представлена методика оценки остаточного ресурса высоковольтных выключателей и контроля качества восстановления износа, основанная на комплексном анализе эксплуатационных данных о расходе коммутационного ресурса при отключениях токов короткого замыкания и на динамике износа узлов выключателя вследствие механических, электрических и тепловых воздействий. Предложен интеллектуальный подход к обработке результатов диагностики, включающий текущую оценку технического состояния выключателя, определение сроков и объёма очередного мониторинга, отслеживание динамики износа узлов выключателя во времени и формирование информационно-методической базы для поддержки эксплуатационного персонала. Показано, что переход от планово-предупредительного обслуживания к ремонту по техническому состоянию позволяет повысить эффективность планирования сроков и объёмов восстановительных работ, снижая при этом риск принятия ошибочных эксплуатационных решений. Отдельное внимание уделено автоматизированному контролю качества выполненного ремонта.

Ключевые слова: высоковольтный выключатель, диагностика состояния, скорость износа, качество ремонта, остаточный ресурс, риск ошибочного решения.

Received: 05.08.2026

Accepted: 06.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

YUQORI VOLTLI O'CHIRGICHLARNING TEXNIK HOLATINI INTELLEKTUAL MONITORING ORQALI ISHONCHLILIGINI OSHIRISH

Abdullayeva Samira Afgan qizi

Texnika fanlari nomzodi, Ozarbayjon energetika ilmiy-tadqiqot va loyiha-qidiruv instituti, Ozarbayjon davlat neft va sanoat universiteti (ADNSU) "Mexanika muhandisligi" kafedrası o'qituvchisi, Ozarbayjon

Jabbarov Tohir Gaffar o'g'li

Texnika fanlari doktori, professor, Ozarbayjon davlat neft va sanoat universiteti (ADNSU) "Mexanika muhandisligi" kafedrası, Ozarbayjon

Annotatsiya. Maqolada qisqa tutashuv toklarini uzishdagi kommutatsion resurs sarfi to'g'risidagi ekspluatatsion ma'lumotlarni hamda mexanik, elektr va issiqlik ta'sirlari natijasida uzellar yeyilishining dinamikasini kompleks tahlil qilishga asoslangan yuqori voltli o'chirgichlarning qoldiq resursini baholash va yeyilishni tiklash sifatini nazorat qilish metodikasi taqdim etilgan. Diagnostika natijalarini qayta ishlashning intellektual yondashuvi taklif etilgan bo'lib, u o'chirgichning texnik holatini joriy baholash, navbatdagi monitoring muddatlari va hajmini aniqlash, vaqt o'tishi bilan o'chirgich uzellari yeyilishining dinamikasini kuzatib borish hamda ekspluatatsiya xodimlarini qo'llab-quvvatlash uchun axborot-metodik bazasini shakllantirishni o'z ichiga oladi. Rejali-ogohlantiruvchi xizmat ko'rsatishdan texnik holati bo'yicha ta'mirlashga o'tish tiklash ishlarining muddatlari va hajmini rejalashtirish samaradorligini oshirish imkonini berishi, shu bilan birga ekspluatatsion qarorlar qabul qilishdagi xatolar xavfini kamaytirishi ko'rsatilgan. Bajarilgan ta'mirlash sifatini avtomatlashtirilgan tarzda nazorat qilishga alohida e'tibor qaratilgan.

Kalit so'zlar: yuqori voltli o'chirgich, holat diagnostikasi, yeyilish tezligi, ta'mirlash sifati, qoldiq resurs, xato qaror qabul qilish xavfi.

IMPROVING THE RELIABILITY OF HIGH-VOLTAGE CIRCUIT BREAKERS THROUGH INTELLIGENT CONDITION MONITORING

Abdullayeva Samira Afgan gyzy

Candidate of Technical Sciences, Azerbaijan Scientific Research
and Design-Survey Institute of Energy; Lecturer at the Department
of Mechanical Engineering, Azerbaijan State Oil and Industry
University (ASOIU), Azerbaijan

Jabbarov Tahir Gafar oglu

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of
Mechanical Engineering, Azerbaijan State Oil and Industry
University (ASOIU), Azerbaijan

Abstract. The article presents a methodology for assessing the remaining useful life of high-voltage circuit breakers and controlling the quality of wear restoration, based on a comprehensive analysis of operational data regarding the consumption of the switching resource during short-circuit current interruptions and the wear dynamics of breaker components resulting from mechanical, electrical, and thermal influences. An intelligent approach to processing diagnostic results is proposed, which includes the current assessment of the circuit breaker's technical condition, determining the schedules and scope of subsequent monitoring, tracking the wear dynamics of breaker components over time, and forming an information and methodological base to support operational personnel. It is shown that the transition from scheduled preventive maintenance to condition-based maintenance improves the efficiency of planning the schedules and scopes of restoration work while reducing the risk of making erroneous operational decisions. Special attention is paid to the automated quality control of completed repairs.

Keywords: high-voltage circuit breaker, condition diagnostics, wear rate, repair quality, remaining useful life, risk of erroneous decision.

Введение. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта высоковольтных выключателей остаётся одной из актуальных задач эксплуатации энергосистем. Высоковольтные выключатели — один из наиболее ответственных узлов энергосистемы, и именно для них задача цифровизации диагностики особенно актуальна: ошибка в оценке технического состояния способна привести либо к неоправданным затратам на преждевременный ремонт исправного оборудования, либо, что значительно опаснее, к системной аварии вследствие пропущенного

дефекта.

Один из перспективных путей решения этой задачи — построение интеллектуальной информационной системы, обеспечивающей анализ надёжности и непрерывный контроль технического состояния выключателей с целью повышения достоверности оценки их остаточного ресурса [1]. Ключевая особенность такой системы заключается в эффективном сопоставлении информации о техническом состоянии выключателей систем непрерывного мониторинга, поступающих как от встроенных или переносных диагностических комплексов, так и

результатов периодических профилактических испытаний оборудования [2]. Интеллектуальный анализ этих потоков информации объединяет в себе оценку текущего состояния оборудования, позволяет оценить «скорость износа» узлов и выявить так называемые «слабые звенья» — конструктивные элементы, находящиеся в критической зоне [3]. Целесообразность установки переносных средств непрерывной диагностики возрастает по мере сокращения остаточного интервала межремонтного периода; в первую очередь такие устройства рекомендуется устанавливать на линейных выключателях, где число автоматических отключений заметно превышает среднестатистическое.

Сравнительный анализ методов испытаний отдельных узлов выключателя даёт возможность оценить, насколько эффективно каждый метод выявляет дефекты, и, соответственно, выбрать оптимальный набор средств контроля [4]. Контроль технического состояния принято различать по этапам жизненного цикла оборудования: при вводе в эксплуатацию нового или прошедшего капитальный ремонт выключателя; непосредственно перед капитальным ремонтом; в рамках текущих и межремонтных проверок. Учитывая, что число контролируемых параметров исчисляется десятками, а сама процедура ранжирования выключателей и выявления «слабых звеньев» требует специальной подготовки персонала, ручная обработка подобного объёма данных становится трудоёмкой и малоэффективной — что и обуславливает необходимость автоматизации этого процесса.

Литературный анализ и методы. Информация о техническом состоянии выключателя, формируемая по результатам испытаний, включает в себя ряд взаимосвязанных сведений [5].

Заклучение по результатам испытаний. В выходном документе по результатам контроля отражается:

- полнота выполнения регламентированного объёма испытания;
- соответствие измерительных приборов установленным требованиям;

- сопоставление нормативных и фактически измеренных значений параметров;
- проверка условия неперевышения остаточного срока безотказной работы интервалу времени до планового ремонта;
- перечень дефектов, выявленных при осмотре и испытаниях однотипных выключателей;
- данные об остаточном ресурсе узлов выключателя;
- перечень узлов выключателя, требующих восстановления износа при очередном отключении выключателя.

Анализ скорости износа узлов. Скорость нарастания износа того или иного узла выключателя определяется как отношение приращения износа к прошедшему интервалу времени между двумя последовательными испытаниями:

$$vIz(t_2 - t_1) = \frac{Iz(t_2) - Iz(t_1)}{(t_2 - t_1)}, \quad (1)$$

где: $Iz(t_2)$ — величина износа, установленного при текущем испытании выключателя; $Iz(t_1)$ — величина износа, установленного при предшествовавшем испытании.

На основе оценки скорости износа узлов выключателя формируется ранжирование узлов по темпу изнашивания, сравнение полученных скоростей со средними значениями для однотипных выключателей, уточнение периодичности последующих испытаний для наиболее «быстро изнашивающихся» узлов, а также прогнозирование момента, когда тот или иной параметр достигнет предельно допустимого значения.

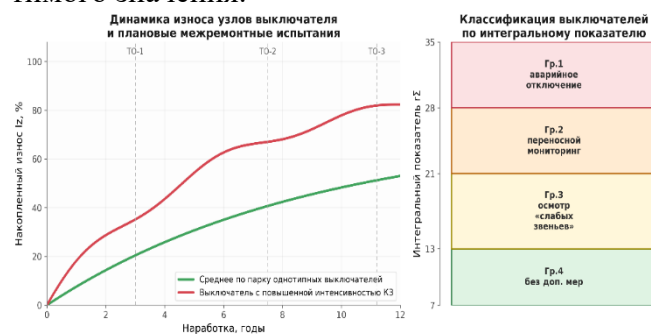


Рис.1. Типовая динамика износа узлов выключателя во времени.

Уточнение сроков очередного испытания и динамика изменения износа выключателя. Даты межремонтных испытаний определяются исходя из фактического технического состояния конкретного выключателя, а не по жёсткому регламенту. Персоналу предоставляются:

- оценка остаточного интервала безотказной работы каждого узла выключателя;
- рекомендуемые дата и объём очередного мониторинга (при отсутствии встроенных диагностических средств — дата и объём внепланового испытания);
- обновлённый план-график диагностических мероприятий по предприятию в целом.

Отслеживание изменения износа во времени (рис. 1) необходимо для характеристики технического состояния оборудования, изучения особенностей расходования его ресурса и разработки мер по повышению безотказности. Персоналу предоставляется:

- график изменения износа узлов во времени с указанием параметров каждой коммутации (времени отключения тока КЗ, эффективности автоматического или ручного повторного включения, вида и величины тока КЗ);
- сопоставление индивидуальной кривой износа со средней зависимостью, характерной для аналогичного выключателя;
- классификация условий эксплуатации выключателя.

Если расход ресурса конкретного выключателя превышает среднестатистический, оборудование относится к группе повышенного риска возникновения системных аварий.

Метод планирования сроков и объема восстановления износа. Очевидная необходимость перехода от проведения планового ремонта выключателя с жёстко регламентированной периодичностью и объёмом к ремонту по техническому состоянию сопряжена с преодолением ряда методических трудностей — прежде всего, с отсутствием формализованного способа ранжирования выключателей по их надёжности и значимости в схеме, а также возможности характеристики надёжности узлов выключателя с целью формирования объёма ремонта [6]. Практика эксплуатации показывает,

что заданная периодичность восстановления износа соблюдается не всегда. Выключатели, техническое состояние которых вызывает обоснованные опасения, порой не выводятся в плановый ремонт своевременно, а при отсутствии резервных узлов восстанавливаются лишь отдельные составляющие износа — т.е. после ремонта его величина не возвращается к исходному значению. Ведь узел не новый. Это, в свою очередь, требует сокращения межремонтного периода, что на практике, как правило, реализуется далеко не всегда.

Ранжирование выключателей в порядке понижения их надёжности и значимости позволяет выделить приоритетные объекты для планового ремонта в соответствии с доступным ресурсом предприятия. Если же за основу взять рекомендуемую заводом-изготовителем периодичность ремонтов, то могут быть выделены для ремонта выключатели, срок безотказной работы которых больше этого интервала.

Эффективным подходом к выполнению ранжирования парка выключателей служит расчёт интегрального показателя значимости выключателя по ряду значимых признаков. На этой основе разработаны метод и алгоритм расчёта, учитывающие особенности функционирования конкретного выключателя и его значимые признаки [7]. К таким значимым признакам можно отнести: $T_{сл}$ — срок службы выключателей; $T_{н.сл}$ — нормативный срок службы выключателя; $\Delta I z_{кз}^*$ — оценка механического износа, возникающего при отключении (включении) КЗ; $T_{ср}$ — наработка после планового среднего ремонта; $T_{пр}$ — регламентированная длительность межремонтного периода; $m_{а.з}^*$ — число отключений выключателя по аварийной заявке для ликвидации дефекта; $h_{ав}^*$ — удельное число отказов в отключении КЗ.

В таблице 1 приведены разновидности каждого из выбранных семи признаков. Классификация проводилась по пятибалльной системе. Помимо количественных признаков в рассмотрение включены и признаки с номинальной шкалой измерения — техническое состояние и последствия возможного отказа. Каждый выключатель имеет индивидуальные реализации *разновидности признака (РП)*.

Например, у каждого выключателя свой срок службы, механический износ, наработка после планового ремонта и др.

Таблица 1.

Классификация разновидностей значимых признаков

№	Признак	1	2	3	4	5
1	Тсл, лет	< 0,5 Т _{нсл}	0,5–1,0 Т _{нсл}	1,0–1,5 Т _{нсл}	1,5–2,0 Т _{нсл}	> 2,0 Т _{нсл}
2	ΔI_{Σ}^* , о.е.	0–0,2	0,2–0,4	0,4–0,6	0,6–0,8	> 0,8
3	Тпр, лет	< 0,3 Т _{пр}	0,3–0,6 Т _{пр}	0,6–0,9 Т _{пр}	0,9–1,2 Т _{пр}	> 1,2 Т _{пр}
4	m_{Σ}^* , отк/год	1	2	3	4	≥ 4
5	n_{Σ}^* , отк/год	0–0,5	0,5–1	1–1,5	1,5–2	≥ 2
6	Техническое состояние	хорошее	удовлетворительное	зона риска	дефектное	аварийное
7	Последствия отказа	снижение структурной надёжности	ограничение транзита ЭЭ	отказ в транзите ЭЭ	обесточение потребителя	системная авария

Суммируя порядковые номера разновидностей, реализовавшихся для конкретного выключателя, получаем его интегральный показатель $r\Sigma = \Sigma r_i$ ($i=1,7$). Рассчитав этот показатель для всех единиц оборудования, их можно упорядочить по возрастанию значимости и разделить на четыре группы, каждой из которых соответствует своя стратегия обслуживания (рисунок 2). В первую группу относим выключатели, интегральный показатель которых изменяется в интервале (28–35). Выключатели этой группы должны быть в ближайшие дни по аварийной заявке выведены на плановый ремонт. Во вторую группу относим выключатели, интегральный показатель которых изменяется в интервале (21–27). Для этих выключателей рекомендуется установка переносных систем непрерывного мониторинга. Если интегральный показатель оказывается в интервале (13–20), то выключатель относится к третьей группе, и повышение их надёжности работы рекомендуется путём ежедневного осмотра с использованием сведений о «слабых звеньях». У выключателей четвёртой группы, интегральные показатели которых находятся в интервале (7–13), никаких дополнительных мер по обслуживанию выключателя не требуется [8].

Поскольку ежемесячное уточнение интегральных показателей для всего парка выключателей энергообъекта — задача трудоёмкая, подверженная субъективным ошибкам и сопряжённая с повышенным риском

ошибочного решения, была разработана подсистема автоматизированного планирования сроков и объёма восстановления износа. Здесь выделены два взаимосвязанных блока.



Рис.2. Рекомендации по техническому обслуживанию выключателей.

1. Планирование сроков восстановления износа. Блок планирования сроков формируется по данным межремонтных испытаний и включает уточнение распределения значимости базовых признаков для однотипных выключателей, оценку значимости базовых признаков и интегрального показателя конкретного выключателя, а также рекомендации по техническому обслуживанию и ремонту каждого выключателя.

2. Определение объёма восстановления износа. Формируется по данным испытаний, проведённых перед плановым ремонтом, и устанавливается на основе результатов расчёта остаточного ресурса узлов выключателя: перечень выявленных дефектов и отказов в результате проведения аварийного ремонта, сведения о нерабочих состояниях и динамике изменения диагностических показателей выключателя, заключение о необходимом объёме восстановительных работ, а также оценка среднего остаточного срока службы и средней скорости износа узлов выключателя [9].

Результаты. Оценка качества восстановления износа складывается из двух составляющих:

- качества отремонтированного оборудования (характеризует техническое состояние выключателя после ремонта и его соответствие нормативно-технической документации);
- качества выполненных ремонтных работ (характеризует организационно-техническую дисциплину исполнителя).

Качество отремонтированного оборудо-

вания оценивается по трёхуровневой шкале:

- полное соответствие требованиям НТД;
- соответствие с ограничениями;
- несоответствие требованиям НТД.

Высшая оценка присваивается, если устранены все выявленные дефекты, выполнены требования НТД, а результаты приёмо-сдаточных испытаний свидетельствуют о непревышении диагностическими параметрами предельно допустимых значений. Вместе с тем такая формальная оценка не исключает возможность наличия после ремонта величины остаточного ресурса, недостаточного для нормальной работы в течение следующего межремонтного периода [10].

Для устранения этого противоречия предлагается уточнить оценку качества отремонтированного оборудования путём учёта минимально допустимого значения восстановления износа по i -му диагностическому параметру $\Delta I_{i,мд}$, где:

$$\Delta I_{i,мд} = T_{мр} \cdot vI_{zi} > I_{z_{i,д}} - I_{z_{i,п}}; i=1, m_{п} \quad (2)$$

vI_{zi} — скорость износа по i -му диагностическому параметру; $m_{п}$ — число диагностических параметров; $I_{z_{д}}$ и $I_{z_{п}}$ — соответственно величина износа до и после ремонта; $T_{мр}$ — межремонтный период.

Чтобы учесть $I_{z_{д}}$ и $I_{z_{п}}$, вводится уточнённая четырёхуровневая шкала оценок качества ремонта (K_p) оборудования. Будем считать:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{если } I_{z_{д}} > 1, \text{ а } (1 - I_{п}) \geq \Delta I_{мд}, & \text{то } K_p = 4 \\ \text{или } (1 - I_{п}) < \Delta I_{мд}, & \text{то } K_p = 3 \\ \text{если } I_{z_{д}} \leq 1, \text{ а } (1 - I_{п}) < \Delta I_{мд}, & \text{то } K_p = 2 \\ \text{или } I_{z_{д}} \leq I_{п}, & \text{то } K_p = 1 \end{array} \right\}$$

Оценив качество ремонта по всем $i=1, m_{п}$ параметрам, можем строго оценить работу ремонтных служб и контролировать выполнение гарантийных обязательств.

Предлагается итоговую оценку качества ремонта выключателя в целом проводить по критерию:

$$\left. \begin{array}{l} K_{p,min} = \min\{K_{p,i}\}_{m_{п}} \\ \text{если } K_{p,min} \leq 2, \text{ то } K_{p,\Sigma} = 2, \\ \text{если } K_{p,min} > 2, \text{ то } K_{p,\Sigma} = m_{п}^{-1} \sum_{i=1}^{m_{п}} K_{p,i} \end{array} \right\}$$

где $m_{п}$ — число диагностических параметров

Следует отметить, что показатели качества отремонтированного оборудования контролируются по результатам приёмо-сдаточных испытаний выключателей и при испытаниях по завершении подконтрольной эксплуатации. Число контролируемых при этом параметров, как правило, включает показатели назначения, надёжности, безопасности, экологичности и эргономичности и может исчисляться десятками, что делает ручной расчёт крайне громоздким и трудоёмким.

Для решения этой задачи разработана система «Проверка качества ремонта и выполнения гарантированных обязательств», состоящая из двух взаимосвязанных подсистем. Первая — оценка технического состояния выключателя непосредственно после ремонта, включающая расчёт величины износа узлов и формирование заключения о качестве выполненных работ. Вторая — оценка соответствия технического состояния выключателя гарантийным обязательствам подрядчика, основанная на анализе динамики износа узлов в течение гарантийного периода эксплуатации (как правило, двух лет эксплуатации) и формировании итогового заключения о выполнении этих обязательств.

Обсуждение. Принципиальное различие между подсистемами состоит в моменте контроля. Оценка технического состояния выключателя после ремонта проводится после завершения подконтрольной эксплуатации, тогда как контроль гарантийных обязательств осуществляется по результатам измерений диагностических параметров спустя два года эксплуатации. Именно этот срок в большинстве случаев предусматривается для выполнения гарантированных обязательств по устранению возможных дефектов и отказов силами исполнителя ремонтных работ.

Дополнительным критерием обоснованности вывода выключателя в ремонт служит сопоставление фактического числа отключений тока K_3 пкз и наработки t с их допустимыми значениями. Необоснованный ремонт при $пкз < пкз_{доп}$ и $t < t_{доп}$ означает недоиспользование ресурса оборудования и приводит к неоправданным затратам.

При завершении периода действия

гарантированных обязательств подсистемой подготавливается документ, в соответствии с которым руководству предприятия представляется документ, отражающий имевшие место дефекты и отказы выключателя. Дефекты классифицируются по способу обнаружения: во время осмотров и при проведении межремонтных испытаний. К числу дефектов при этом относится и случай, когда остаточное время безотказной работы не превышает остаточное время межремонтного периода.

Межремонтный срок выключателя определяется из допустимой длительности работы и допустимого числа отключений короткого замыкания. Необоснованный вывод выключателей в ремонт при $p_{к.з.} < p_{к.з., доп.}$ и $t < t_{доп}$ связан с недоиспользованием возможностей выключателей и, следовательно, дополнительными, излишними затратами на ремонт.

В соответствии с характером процесса функционирования параметр потока отказов выключателя $\omega(t)$ целесообразно представлять в виде суммы трёх составляющих:

$$\omega(t) = \omega_0(t) + \omega_1(t, k) + \omega_2(t), \quad (5)$$

где $\omega_0(t)$ – составляющая, обусловленная воздействием внешних возмущающих факторов (атмосферные и коммутационные перенапряжения, некачественный ремонт и т.п.) и не зависящая от наработки; $\omega_1(t, k)$ – составляющая, обусловленная регулировкой выключателей вследствие отключений КЗ (при интенсивных КЗ доминирует именно эта составляющая, а при их отсутствии обращается в нуль); $\omega_2(t)$ – составляющая, обусловленная старением элементов выключателей и разрегулировкой при длительной эксплуатации (износ прокладок и т.д.).

Исследования возмущающих факторов позволяют прогнозировать возможность возникновения отказов выключателей и разработать соответствующие мероприятия. Независимость воздействия возмущений от длительности эксплуатации выключателей свидетельствует о

независимости $\omega_0(t)$ и T .

Соотношение величин $\omega_1(t, k)$ и $\omega_2(t)$ определяется интенсивностью повреждения присоединений. При частых коротких замыканиях $\omega_1(t, k) \gg \omega_2(t)$, а при отсутствии коротких замыканий $\omega_1(t, k) = 0$. Анализ результатов ремонтных работ позволяет выявить наиболее ненадёжные элементы, выработать мероприятия по целенаправленному усилению этих элементов и тем самым уменьшить величину $\omega_2(t)$, увеличивая длительность межремонтного периода.

Заключения. В работе предложена комплексная методология интеллектуального анализа технического состояния высоковольтных выключателей, основанная на оценке скорости износа и расчёте интегрального показателя значимости.

Разработанный алгоритм ранжирования позволяет объективно выделить наиболее ответственные и изношенные выключатели, требующие немедленного вмешательства, что существенно снижает риск перерастания локальных дефектов в системные аварии.

Предложен формальный критерий оценки качества восстановления износа, учитывающий реальную динамику изменения диагностических параметров, что повышает ответственность ремонтных служб и гарантирует заданный уровень безотказности.

Разработанная система информационной и методической поддержки персонала позволяет автоматизировать процесс планирования ремонтов, снизить субъективность и, как следствие, минимизировать эксплуатационные затраты.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются интеграция методов искусственного интеллекта для прогнозирования остаточного ресурса и разработка цифровых двойников выключателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Фархадзаде, Э. М., Мурадалиев, А. З., & Рафиева, Т. К. (2006). Учет остаточного износа конструктивных материалов электрооборудования. Экоэнергетика, (1), 22–24.

- [2] Рафиева, Т. К., & Абдуллаева, С. А. (2013). Автоматизированный контроль технического состояния выключателей распределительных устройств энергосистемы. Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики: Международный научный семинар им. Ю. Н. Руденко, 63, 506–513.
- [3] Китушин, В. Г., & Перминов, А. Ю. (1999). Модель остаточного ресурса агрегата. В Н. И. Воропай (Ред.), Надёжность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы (с. 381–386). Наука, Сибирское отделение РАН.
- [4] Фархадзаде, Э. М., Мурадалиев, А. З., Рафиева, Т. К., & Абдуллаева, С. А. (2014). Автоматизированный анализ парка выключателей. Энергетик, (5), 11–13.
- [5] Фархадзаде, Э. М., & Мурадалиев, А. З. (2012). Информационная поддержка эксплуатационного контроля и ремонта трансформаторного оборудования в энергосистеме. Энергетик, (10), 7–10.
- [6] Сорокин, А. С., Коваленко, А. И., Малютин, М. С., Лебедев, А. А., & Султанов, М. М. (2024). Алгоритм автоматизированной оценки технического состояния высоковольтного элегазового выключателя по ограниченному набору данных. Электрические станции, (1), 40–45.
- [7] Farhadzadeh, E. M., Farzaliyev, Y. Z., & Muradaliyev, A. Z. (2013). Principles of classification statistical data about reliability of the electric equipment of power supply systems. Reliability: Theory & Applications, 8(3/30), 56–74.
- [8] Фархадзаде, Э. М., Мурадалиев, А. З., Абдуллаева, С. А., & Ашурова, У. К. (2020). Классификация интегральных показателей оперативной эффективности работы объектов ЭЭС. Надёжность и безопасность энергетики, 13(3), 218–224. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-3-218-224>
- [9] Чичёв, С. И., Калинин, В. Ф., & Глинкин, Е. И. (2011). Система контроля и управления электротехническим оборудованием подстанций: Монография.
- [10] Михеев, Г. М. (2019). Электростанции и электрические сети. Диагностика и контроль электрооборудования. Профобразование.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Абдуллаева, С. А., & Джаббаров, Т. Г. (2026). Повышение надёжности высоковольтных выключателей через интеллектуальный мониторинг технического состояния. Цифровые технологии в промышленности, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.23>

UO‘K: 622.349

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.25

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**MARJONBULOQ KONI RUDASIDAN OLTINNI JINCHAN REAGENTI
YORDAMIDA TANLAB ERITISHNING TEXNOLOGIK SAMARADORLIGINI
NATRIY SIANIDI BILAN QIYOSIY BAHOLASH**



**Rahmonova Umida
Toshpo'latovna**

Qarshi davlat texnika universiteti,
Mustaqil izlanuvchi, Qarshi,
O'zbekiston
Email:
Raxmanova4302@gmail.com
ORCID ID: 0009-0000-8279-0138
Science ID: MUZ-0426-0028



**Xasanov Abdurashid
Soliyevich**

Texnika fanlari doktori, professor,
“Olmaliq kon-metallurgiya
kombinati” AJ Innovatsion
texnologiyalarni rivojlantirish va
joriy etish markazi texnologiya
bo'yicha direktor o'rinbosari,
Olmaliq, O'zbekiston
E-mail: a.xasanov@srt-journal.uz
ORCID ID: 0009-0004-9162-7622
Science ID: DTV-1225-0005



**Saidaxmedov Aktam
Abdisamiyevich**

Navoiy davlat konchilik va
texnologiyalar universiteti, t.f.d.,
dotsent, Navoiy, O'zbekiston
E-mail: aktam.saidaxmedov@bk.ru
ORCID ID: 0000-0002-0482-3413
Science ID: DSN-1225-0001

Annotatsiya. “Jinchan” ekologik xavfsiz reagentlari yordamida oltinni tanlab eritmaga o'tkazish jarayonini o'rganish maqsadida Marjonbuloq oltin tarkibli ruda konidan olingan namunalarda tajriba-tadqiqot ishlari olib borildi. Tajriba natijalariga ko'ra, ruda -0,074 mm zarracha o'lchamigacha 90% dan ortiq darajada yanchilganda, bo'tanadagi qattiq zarralar miqdori 40%, oxak sarfi 3 kg/t, ishqoriy muhitda dastlabki ishlov berish vaqti 2 soat, “Jinchan” reagenti sarfi 350 g/t va tanlab eritish davomiyligi 16 soat bo'lgan optimal texnologik sharoitlarda oltinni tanlab eritmaga o'tkazish darajasi 95,2% ga yetdi. Olingan natijalar “Jinchan” reagenti oltinni yuqori samaradorlik bilan tanlab eritmaga o'tkazish imkoniyatiga ega ekanligini hamda uni an'anaviy sianidli texnologiyalarga ekologik xavfsiz muqobil reagent sifatida qo'llash istiqbolli ekanligini ko'rsatdi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, an'anaviy sianlash texnologiyasi bilan taqqoslaganda, ekologik xavfsiz «Jinchan» reagenti yordamida oltinni tanlab eritish davomiyligi 4 soatga qisqardi, bu esa texnologik jarayonning unumdorligi va iqtisodiy samaradorligini sezilarli darajada oshirdi. Tanlab eritishdan keyin hosil bo'lgan chiqindilarning ekologik xavfsizligi ham baholandi. Tahlillar natijasida chiqindilar tarkibidagi erkin sianid, qo'rg'oshin, rux va myshyak miqdorlari amaldagi davlat ekologik standartlarida belgilangan ruxsat etilgan me'yorlardan past ekanligi aniqlandi. Shu sababli, mazkur chiqindilar qo'shimcha detoksikatsiya jarayonisiz ekologik talablarga muvofiq joylashtirilishi mumkin. Qiyosiy iqtisodiy tahlil natijalari «Jinchan» reagentini qo'llash ishlab chiqarish xarajatlarini sezilarli darajada qisqartirishini ko'rsatdi.
Kalit so'zlar: Jinchan reagenti, natriy sianidi, oltin, tanlab eritish, gidrometallurgiya, Marjonbuloq koni, kinetika, ekologik xavfsiz reagent, oltinni ajratib olish, reagent konsentratsiyasi.

Received: 15.07.2026

Accepted: 07.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА ИЗ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАРЖОНБУЛОК С ПОМОЩЬЮ РЕАГЕНТА JINCHAN И ЦИАНИДА НАТРИЯ

**Рахмонова Умида
Тошпулатовна**

Самостоятельный соискатель
Каришского государственного
технического университета,
Кариш, Узбекистан

**Хасанов Абдурашид
Солиевич**

Доктор технических наук,
профессор, заместитель
директора по технологиям
Центра развития и внедрения
инновационных технологий АО
«Алматынский горно-
металлургический комбинат»,
Алматы, Узбекистан

**Саидахмедов Ақтам
Абдисамиевич**

Доктор философии (PhD) по
техническим наукам, доцент,
Навоийский государственный
университет горного дела и
технологий, Навои, Узбекистан

Аннотация. С целью изучения процесса выщелачивания золота с использованием экологически безопасных реагентов «Джинчан» были проведены опытно-исследовательские работы на образцах, полученных из золотосодержащего рудного месторождения Марджанбулак. По результатам экспериментов при измельчении руды до размера частиц $-0,074$ мм свыше 90%, содержание твердых частиц в пульпе составило 40%, расход извести 3 кг/т, время предварительной обработки в щелочной среде 2 часа, расход реагента «Джинчан» 350 г/т и продолжительность выщелачивания 16 часов при оптимальных технологических условиях степень выщелачивания золота достигла 95,2%. Полученные результаты показали, что реагент «Джинчан» обладает высокой эффективностью селективного перехода золота в раствор и его использование в качестве экологически безопасного альтернативного реагента к традиционным цианидным технологиям является перспективным. Согласно результатам исследования, по сравнению с традиционной технологией цианирования, продолжительность выщелачивания золота с использованием экологически безопасного реагента «Джинчан» сократилась на 4 часа, что значительно повысило производительность и экономическую эффективность технологического процесса. Также была проведена оценка экологической безопасности отходов, образующихся после выщелачивания. В результате анализа было установлено, что содержание свободного цианида, свинца, цинка и мышьяка в отходах ниже допустимых норм, установленных действующими государственными экологическими стандартами. Поэтому эти отходы могут быть размещены в соответствии с экологическими требованиями без дополнительного процесса детоксикации. Результаты сравнительно-экономического анализа показали, что применение реагента «Джинчан» значительно снижает производственные затраты.

Ключевые слова: Реагент Джинчан, цианид натрия, золото, выщелачивание, гидрометаллургия, месторождение Марджанбулак, кинетика, экологически безопасный реагент, извлечение золота, концентрация реагента.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE TECHNOLOGICAL EFFICIENCY OF SELECTIVE GOLD LEACHING FROM MARJONBULOQ ORE USING JINCHAN REAGENT AND SODIUM CYANIDE

**Rahmonova Umida
Toshpulatovna**

*Independent Researcher, Karshi
State Technical University, Karshi,
Uzbekistan*

**Khasanov Abdurashid
Solievich**

*Doctor of Technical Sciences,
Professor, Deputy Director for
Technology, Center for the
Development and Implementation of
Innovative Technologies, JSC
"Almalyk Mining and Metallurgical
Combine", Almalyk, Uzbekistan*

**Saidakhmedov Aktam
Abdisamievich**

*PhD in Technical Sciences,
Associate Professor, Navoi State
University of Mining and
Technologies, Navoi, Uzbekistan*

Abstract. To study the process of selective gold leaching using environmentally safe "Jinchan" reagents, experimental research was conducted on samples taken from the Marzhanbulak gold-bearing ore deposit. According to the experimental results, under optimal technological conditions, where the ore was ground to a particle size of -0.074 mm at more than 90%, the solid particle content in the slurry was 40%, the lime consumption was 3 kg/t, the initial treatment time in an alkaline medium was 2 hours, the "Jinchan" reagent consumption was 350 g/t, and the leaching duration was 16 hours, the degree of gold leaching reached 95.2%. The results obtained showed that the "Jinchan" reagent has the ability to selectively dissolve gold with high efficiency, and its use as an environmentally safe alternative reagent to traditional cyanide technologies is promising. According to the research results, compared to traditional cyanidation technology, the duration of gold leaching using the environmentally friendly "Jinchan" reagent was reduced to 4 hours, which significantly increased the productivity and economic efficiency of the technological process. The environmental safety of the waste generated after leaching was also assessed. As a result of the analysis, it was established that the content of free cyanide, lead, zinc, and arsenic in the waste is below the permissible limits established by current state environmental standards. Therefore, these wastes can be disposed of in accordance with environmental requirements without additional detoxification processes. The results of the comparative economic analysis showed that the application of the "Jinchan" reagent significantly reduces production costs.

Keywords: Jinchan reagent, sodium cyanide, gold, leaching, hydrometallurgy, Marjanbulak deposit, kinetics, environmentally safe reagent, gold extraction, reagent concentration.

Kirish. Bungi kunda rivojlangan davlatlarda mineral resurslarni «yashil» konchilik tamoyillari asosida o'zlashtirish, ya'ni foydali qazilmalarni oqilona qazib olish va atrof-muhitni muhofaza qilishga qaratilgan yangi yondashuv ilgari surilmoqda. Ushbu ekologik yo'nalishdagi siyosat va konchilik sohasidagi yangi talablar natijasida atrof-muhitga xavfi past bo'lgan texnologiyalarni ishlab chiqishga alohida e'tibor qaratila boshlandi. Xususan, oltinni sianid qo'llamasdan tanlab eritmaga o'tkazish texnologiyalarini tadqiq etish, takomillashtirish va sanoatda qo'llash bugungi kunda dolzarb ilmiy va amaliy yo'nalishlardan biriga aylandi. Hozirgi kunda oltinni sianidsiz tanlab eritishning bir qator muqobil texnologiyalari ishlab chiqilgan va ular ustida keng ko'lamli ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bular qatoriga tiokarbamidli tanlab eritish, tiosulfatli tanlab eritish, galogenlash usuli, mikrobiologik tanlab eritish va boshqa ekologik xavfsiz texnologiyalar kiradi. Ushbu usullar yuqori zaharli natriy sianidiga nisbatan ekologik xavfsizligi bilan ajralib turadi va

oltinni ajratib olishning samarali muqobil texnologiyalari sifatida baholanadi. An'anaviy oltinni tanlab eritish texnologiyalarida ko'pincha zaharli va qimmat reagentlardan foydalaniladi, bu esa ularning keng miqyosda sanoatda qo'llanilishini cheklaydi. Shu sababli so'nggi yillarda olimlar tomonidan oltinni tanlab eritmaga o'tkazish uchun ekologik xavfsiz va samarali reagentlar yaratish bo'yicha ko'plab tadqiqotlar olib borildi. Natijada bozorda oltinni tanlab eritish uchun yangi avlod ekologik toza reagentlari, jumladan, "Shimoli-sharqiy yo'lbars", "Sikada" va "Szin Sin" kabi preparatlar paydo bo'ldi. Ushbu reagentlardan foydalanish atrof-muhitga salbiy ta'sirni kamaytirish hamda ishlab chiqarish xavfsizligini oshirish imkonini berdi. Gidrometallurgiya zavodlarida ruladarni sianidli qayta ishlash jarayonida atrof-muhitning ifloslanishi va suv resurslarining zararlanish xavfi yuqori hisoblanadi. Mazkur xavflarni kamaytirish hamda ekologik xavfsizlikni ta'minlash maqsadida oltinni ekologik toza reagentlar yordamida tanlab eritmaga o'tkazish

texnologiyalarini qo'llash muhim ahamiyat kasb etadi.

Ushbu maqolada Marjonbuloq oltin koni rudalarini ekologik xavfsiz «Jinchan» reagenti yordamida tanlab eriti bo'yicha o'tkazilgan tajribalar natijalari keltirilgan. Tadqiqotda «Jinchan» reagentining oltinni tanlab eritmaga o'tkazish samaradorligi, texnologik ko'rsatkichlari hamda uning ekologik afzalliklari baholangan.

Adabiy manbalar tahlili va tadqiqot metodologiyasi. Rudaning ko'p elementli tahlil natijalari 1-jadvalda keltirilgan. Tahlil natijalariga ko'ra, ruda tarkibidagi asosiy qimmatbaho element oltin bo'lib, uning miqdori 2,4 g/t ni tashkil etadi. Shuningdek, rudada oltin bilan bir qatorda kumush mavjud bo'lib, mis, qo'rg'oshin, rux, margimush va boshqa elementlarning miqdori juda past ekanligi aniqlangan. Ruda tarkibida umumiy uglerod miqdori 7,4% ni tashkil etadi. Keyingi tahlillar natijalari uglerodning asosiy qismi noorganik shaklda ekanligini ko'rsatdi. Shu sababli mazkur uglerod sianidli eritmalarda oltinni tanlab eritish jarayoniga sezilarli salbiy ta'sir ko'rsatmaydi.

Rudaning asosiy mineralogik tarkibi 2-jadvalda keltirilgan. Tahlil natijalariga ko'ra, mazkur ruda uglerodli oltin rudasi turiga mansub bo'lib, mineralogik tarkibi nisbatan sodda hisoblanadi. Ruda tarkibida margimush va boshqa zararli aralashmalarning miqdori past darajada ekanligi aniqlangan. Oltinning umumiy miqdori yuqori bo'lmaganligiga qaramasdan, u asosan o'rta va mayda zarrachalar ko'rinishida tarqalgan. Oltin zarrachalarining katta qismi monomineral (erkin) holda va kvars bilan uchraydi hamda yaxshi ochilganligi sababli ularni tanlab eritish jarayonida eritmaga o'tkazish uchun qulay sharoit mavjud.

1-jadval

Rudalarning ko'p elementli tahlili natijalari (%)

Elementlar	Au*	Ag*	Cu	Pb	Zn
Tarkibi	2,4	4,1	0.005	0.007	0.001
Elementlar	S	Fe	As	C	CaO
Tarkibi	0.17	0.15	0.007	7.4	5.47
Elementlar	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃		
Tarkibi	0.34	52.06	0.24		

*— g/t.

Marjonbuloq oltin konini o'zlashtirish loyihasida mazkur rudadan oltinni ajratib olish uchun yanchilgan rudani sianidli tanlab eritish texnologiyasi asosiy jarayon sifatida tanlangan.

Tadqiqotlar uchun texnologik sxema rudani

tayyorlash, tanlab eritish, qattiq va suyuq fazalarni ajratish hamda oltinni eritmadan ajratib olish bosqichlarini o'z ichiga oladi. Tajribalarda rudaning yanchilish mayinligi -0,074 mm (90% dan yuqori) qilib tayyorlandi. Mineralogik tahlil natijalariga ko'ra, metall minerallari asosan 0,3% limonit hamda oz miqdorda pirit, mis minerallari va arsenopiritdan iborat. Rudaning asosiy qismini silikatli minerallar tashkil etadi. Jumladan, kvarsning umumiy miqdori 89,12% gacha yetadi. Shuningdek, kalsit, dolomit, seritsit va xlorit ikkinchi darajali minerallar sifatida uchraydi.

2-jadval

Rudaning mineral tarkibi

	Minerallar	Nisbiy miqdori (%)
Metall rudalar	Pirit	0.05
	Arsenopirit	0.01
	Mis minerallari	0,1-0,5
	Limonit	0.2
	Boshqa oksidlangan temir rudasi	0.16
	kvars	89,12
	Kvars, kalsit, dolomit va minerallar	4.56
Nometall minerallar	Seritsit, xlorit	5.80
Jami		100

Rudaning fazaviy kimyoviy tahlili o'tkazilib, oltinning minerallar bo'yicha taqsimlanishi aniqlandi. Tahlil natijalari 3-jadvalda keltirilgan. Natijalarga ko'ra, ruda tarkibidagi oltinning asosiy qismi ma'dan komponentlari (asosan kvars) bilan metalning o'zaro bog'lanishi shaklida, qolgan qismi erkin holda uchraydi, oksidlangan mishyak birikmalari bilan bog'liq kumush sul'fozollar ulushi esa atigi 4,4% ni tashkil etadi. Jumladan, kvars va silikatli minerallar bilan bog'langan oltinning nisbiy miqdori 86% ni, erkin holdagi oltinning miqdori 8,7% ni tashkil qilib, mazkur rudani tanlab eritish orqali oltinni eritmaga o'tkazish uchun texnologik jihatdan qulay ekanligini ko'rsatadi.

3-jadval

Oltinning faza tahlili natijalari

Ma'danning komponentlar bilan bog'lanish tabiati	Oltin	
	Tarkibi g/t	Tarqalishi %
Erkin holatdagi metall zarrachalari	0,3	8,7
Ma'dan komponentlari bilan metalning o'zaro bog'lanishi	2,1	86,9
Oksidlangan mishyak birikmalari bilan bog'liq kumush sul'fozollar	0,2	4,4
Temir oksidlari va gidroksidlari bilan bog'lanishi	izlar	-
Mayda sul'fidli birikmalarda	izlar	-
Kvars alyumosilikatlarda	izlar	-
Jami	2,4	100,0

Rudaning sun'iy sochilmalari mikroskopik usulda o'rganilib, oltin zarrachalarining o'lchami va tarqalish xususiyatlari tahlil qilindi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, ruda tarkibidagi oltin asosan o'rta va mayda donali, erkin tarqalgan holda uchraydi. Yirik donali oltin zarrachalari hamda oltinning mikroqo'shimchalari esa juda kam miqdorda kuzatildi. Oltin zarrachalarining granulometrik tarkibi tahlili natijalari 4-jadvalda keltirilgan.

4-jadval

Zarrachalar o'lchamini o'lchash natijalari

Zarracha o'lchami (mm)	Yirik (0.3-0.074)	O'rtacha (0.074-0.03)	Mayda (0.03-0.01)	Mayda va submikron zarrachalar (<0.01)	Jami
Nisbiy tarkibi (%)	8.2	65.2	20.3	6.3	100.0

Yuqorida keltirilgan mineralogik, kimyoviy va fazaviy tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, mazkur kon oltin-kvars turidagi ruda koni bo'lib, nisbatan sodda mineralogik tarkibga ega. Ruda tarkibida margimush kabi zararli aralashmalarning miqdori past bo'lib, bu uni qayta ishlash uchun qulay sharoit yaratadi. Rudada yirik donali oltinning ulushi juda kam. Oltin asosan o'rta va mayda donali zarrachalar ko'rinishida tarqalgan bo'lib, erkin holda yaxshi ochilgan. Bu esa oltinni ajratib olish jarayonida tanlab eritmaga o'tkazish samaradorligini oshirish uchun qulay mineralogik sharoit mavjudligini ko'rsatadi.

Natijalar ularning muhokamasi.

Marjonbuloq oltin koni rudasining mineralogik va texnologik xususiyatlarini hisobga olgan holda, uni qayta ishlash uchun yanchilgan rudani sianidli tanlab eritish texnologiyasi tanlangan. Tajriba quyidagi texnologik sharoitlarda o'tkazildi: rudaning yanchilish darajasi -0,074 mm (90% dan ortiq), bo'tanadagi qattiq zarralar miqdori 40%, ohak sarfi 3 kg/t, natriy sianid sarfi 300 g/t va tanlab eritish davomiyligi 24 soat. Ushbu texnologik rejimlarda oltinning tanlab eritmaga o'tish darajasi 95% ga yetgan.

Jinchan reagentining oltinni tanlab eritish samaradorligini baholash maqsadida dastlab ikkita taqqoslovchi tanlab eritish tajribasi o'tkazildi. Tajribalarda jinchan reagenti va natriy sianiddan foydalanilib, Marjonbuloq oltin koni rudasi uchun texnologik ko'rsatkichlar o'zaro taqqoslandi. Tanlab eritish jarayoni xona haroratida aralashtirgich reaktorda amalga oshirildi. Tanlab eritish tugagach, filtrlanib, qoldiq (kek) quritildi,

aralashtirildi va tahlil uchun namunalar tayyorlandi. So'ngra olingan natijalar asosida har bir reagent uchun oltinning tanlab eritmaga o'tish darajasi hisoblanib, texnologik samaradorligi baholandi.

Sinovlar quyidagi texnologik sharoitlarda o'tkazildi: rudaning yanchilish darajasi -0,074 mm (90%), bo'tanadagi qattiq zarralar miqdori 40%, ohak sarfi 3 kg/t bo'lib, ruda ohak bilan 2 soat davomida dastlabki ishlovdan o'tkazildi. Erituvchi reagent sarfi: natriy sianid 300 g/t, jinchan 350 g/t, tanlab eritish davomiyligi esa 24 soatni tashkil etdi. Erituvchi reagent ohak bilan dastlabki ishlov berish jarayoni tugagach, bir marta qo'shildi. Olingan natijalar asosida jinchan reagenti va natriy sianidning oltinni tanlab eritish samaradorligi taqqoslandi. Taqqoslovchi sinovlar natijalari 5-jadvalda keltirilgan.

5-jadval

Tanlab eritish bo'yicha qiyosiy sinovlar natijalari

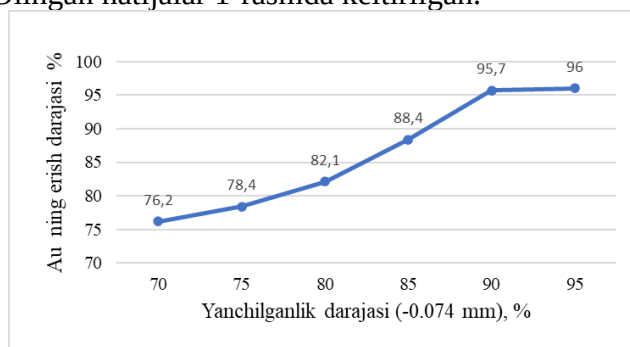
Rudadagi oltin miqdori, g/t	Reagent	Chiqindidagi oltin miqdori, g/t	Eritish darajasi, %
2,4	Natriy sianid	0.1	96,0
2,4	Jinchan	0.11	95,6

Tanlab eritish bo'yicha o'tkazilgan qiyosiy sinovlar natijalari jinchan reagentining oltinni tanlab eritish samaradorligi natriy sianid bilan deyarli bir xil ekanligini ko'rsatdi. Boshlang'ich rudadagi oltin miqdori 2,4 g/t bo'lgan holda, jinchan reagenti qo'llanilganda tanlab eritish qoldig'idagi oltin miqdori 0,11 g/t ni tashkil etdi va oltinning tanlab eritmaga o'tish darajasi 95,6% ga yetdi. Xuddi shu sharoitda natriy sianid qo'llanilganda tanlab eritish qoldig'idagi oltin miqdori 0,1 g/t bo'lib, oltinning tanlab eritmaga o'tish darajasi 96,0% ni tashkil qildi. Olingan natijalar jinchan reagenti nafaqat oltinning tanlab eritmaga o'tish darajasini oshirishini, balki tanlab eritish qoldig'idagi oltin miqdorini kamaytirishini ham ko'rsatdi. Shuningdek, mazkur reagentni qo'llashda ekologik xavfsizlik darajasi yuqori bo'lib, texnologik jarayonni yanada takomillashtirish imkoniyati mavjud. Shu munosabat bilan Marjonbuloq oltin koni rudasini jinchan reagenti yordamida tanlab eritish jarayonining asosiy texnologik parametrlarini optimallashtirish bo'yicha qo'shimcha tadqiqotlar olib borildi.

Tajribalarda tanlab eritish jarayoniga ta'sir etuvchi asosiy texnologik omillar, jumladan rudaning yanchilish darajasi, ohak sarfi, jinchan

reagenti sarfi, bo'tanadagi qattiq zarralar miqdori hamda tanlab eritish davomiyligi o'rganildi. Tajribalarda boshlang'ich rudadagi oltin miqdori 2,4 g/t ni tashkil etdi. Tanlab eritishdan oldin rudaga ohak qo'shib, 2 soat davomida dastlabki ishlov berildi. So'ngra bo'tana xona haroratida aralashtirgich yordamida jinchin reagenti ishtirokida tanlab eritish jarayoniga yuborildi.

Rudaning yanchilish darajasining tanlab eritish jarayoniga ta'sirini o'rganish uchun tajribalar quyidagi texnologik sharoitlarda o'tkazildi: bo'tanadagi qattiq zarralar miqdori 40%, ohak sarfi 3 kg/t bo'lib, ruda ohak bilan 2 soat davomida dastlabki ishlovdan o'tkazildi. Erituvchi reagent sarfi: jinchin 350 g/t, tanlab eritish davomiyligi esa 24 soatni tashkil etdi. Boshqa texnologik parametrlar o'zgarmas holda saqlanib, faqat rudaning yanchilish darajasi o'zgartirildi. Yanchilish mayinligining oltinning eritmaga o'tish darajasiga ta'siri tajriba natijalari asosida baholandi. Olingan natijalar 1-rasmda keltirilgan.



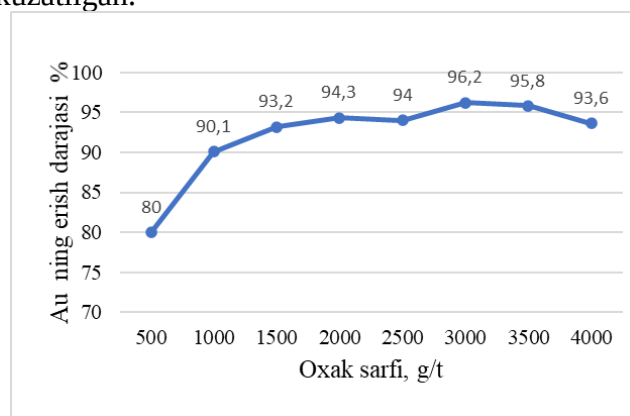
1-rasm. Yanchilish darajasining oltinni erishiga ta'siri.

1-rasmda keltirilgan natijalarga ko'ra, rudaning yanchilish darajasi oltinning eritmaga o'tish darajasiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Yanchilish darajasi -0,074 mm bo'lgan zarrachalar ulushi 75% ni tashkil etganda, oltinning eritmaga o'tish darajasi 78,4% bo'lgan. Yanchilish darajasi oshishi bilan oltinning eritmaga o'tish darajasi ham bosqichma-bosqich ortib borgan. Jumladan, -0,074 mm sinf ulushi 90% ga yetganda, oltinning eritmaga o'tish darajasi 95,7% ni tashkil etgan. Biroq yanchilish darajasi 90% dan yuqori bo'lganda oltinni tanlab eritish darajasi deyarli o'zgarmagan, ya'ni yanchilishni yanada kuchaytirish texnologik jihatdan sezilarli qo'shimcha samara bermagan. Shunday qilib, o'tkazilgan tajribalar natijalariga

asosan, mazkur ruda uchun optimal yanchilish darajasi -0,074 mm sinfning miqdori 90% ni tashkil etishi aniqlandi. Bu sharoitda oltinning eritmaga o'tish darajasi yuqori bo'lib, keyingi yanchilish jarayoni iqtisodiy va texnologik jihatdan maqsadga muvofiq emas.

Ohak miqdorini tanlab eritish jarayoniga ta'sirini o'rganish uchun tajribalar quyidagi texnologik sharoitlarda o'tkazildi: rudaning yanchilish darajasi -0,074 mm (90%), bo'tanadagi qattiq zarralar miqdori 40%, erituvchi reagent sarfi: jinchin 350 g/t, tanlab eritish davomiyligi esa 24 soatni tashkil etdi. Tajribalarda boshqa texnologik parametrlar o'zgarmas holda saqlanib, faqat ohak sarfi o'zgartirildi. Ohak dozasi oltinni eritmaga o'tkazish darajasiga ta'siri baholandi. Olingan natijalar 2-rasmda keltirilgan.

2-rasmda keltirilgan natijalarga ko'ra, oxak 500 g/t qo'llanilgan sharoitda oltinni eritmaga o'tish darajasi past bo'lib, taxminan 80% ni tashkil etgan. Oxak sarfi oshirilishi bilan muhitning ishqoriyligi barqarorlashib, oltinning eritmaga o'tish darajasi ham bosqichma-bosqich ortgan. Oxak sarfi 3 kg/t bo'lganda oltinning eritmaga o'tish darajasi eng yuqori qiymatga yetib, 96,2% ni tashkil etgan. Biroq, oxak sarfi 3 kg/t dan yuqori bo'lgan hollarda oltinni eritmaga o'tish darajasining biroz pasayishi kuzatilgan.

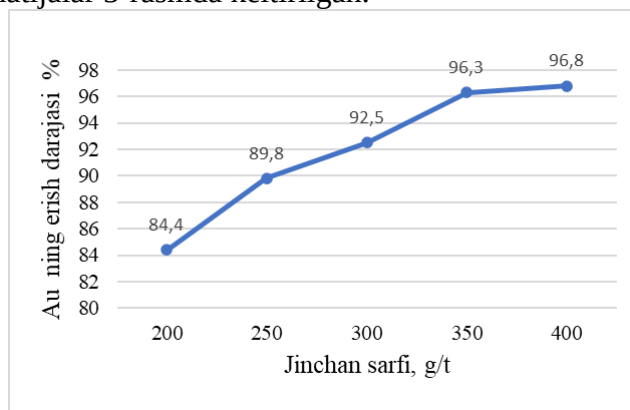


2-rasm. Oxak sarfining oltinni eritmaga o'tish darajasiga ta'siri.

Buning sababi ohakning ortiqcha miqdori bo'tana tarkibida gidroksidlarning haddan tashqari ko'payishiga olib kelib, reagentning faolligini pasaytirishi va oltinning eritmaga o'tish jarayonini sekinlashtirishi bilan izohlanadi. Shunday qilib, o'tkazilgan tajribalar natijalariga asosan, mazkur ruda uchun ohakning optimal sarfi 3 kg/t ekanligi

aniqlandi.

Jinchan reagenti sarfining oltinni erish darajasiga ta'sirini o'rganish uchun tajribalar quyidagi texnologik sharoitlarda o'tkazildi: rudaning yanchilish darajasi -0,074 mm (90%), bo'tanadagi qattiq zarralar miqdori 40%, oxak sarfi – 3 kg/t va tanlab eritish davomiyligi 24 soatni tashkil etdi. Tajribalarda boshqa texnologik parametrlar o'zgaras holda saqlanib, faqat jinchan reagenti sarfi o'zgartirildi. Reagent sarfining oltinni eritmaga o'tish darajasiga ta'siri baholandi. Olingan natijalar 3-rasmda keltirilgan.



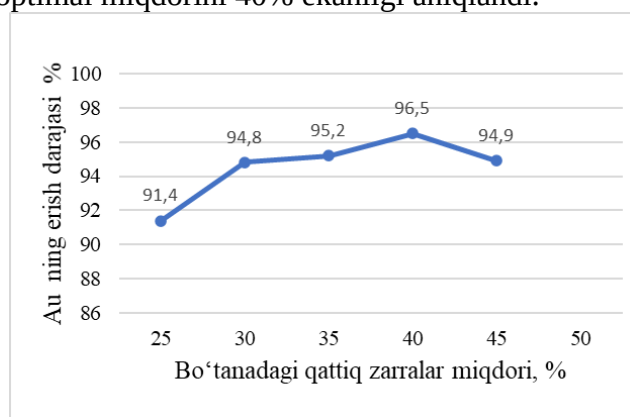
3-rasm. Jinchan reagenti sarfining oltinni eritmaga o'tkazish darajasiga ta'siri.

3-rasmda keltirilgan natijalarga ko'ra, jinchan reagenti sarfi oshirilishi bilan oltinning eritmaga o'tish darajasi ham bosqichma-bosqich ortib borishi kuzatildi. Reagent sarfi 200 g/t bo'lganda oltinning eritmaga o'tish darajasi 84,4% ni tashkil etdi. Reagenti sarfi 350 g/t gacha oshirilganda oltinning tanlab eritmaga o'tish darajasi 96,3% ga yetdi. Biroq reagent sarfini 350 g/t dan yuqori miqdorga oshirish oltinning eritmaga o'tish darajasiga sezilarli ta'sir ko'rsatmadi, ya'ni ko'rsatkich deyarli o'zgarishsiz qoldi. Olingan natijalar asosida mazkur ruda uchun jinchan reagentining optimal sarfi 350 g/t ekanligi aniqlandi. Bu miqdorda reagentdan foydalanish oltinni yuqori eritish darajasini ta'minlaydi va reagentning ortiqcha sarflanishining oldini oladi.

Bo'tanadagi qattiq zarralar miqdorini oltinni erish darajasiga ta'sirini o'rganish uchun tajribalar o'tkazildi, bunda yuqoridagi texnologik sharoitlar saqlanib qolgan holda faqat, bo'tanadagi qattiq zarralar miqdorini o'zgartirildi. Olingan tajriba natijalari 4-rasmda keltirilgan.

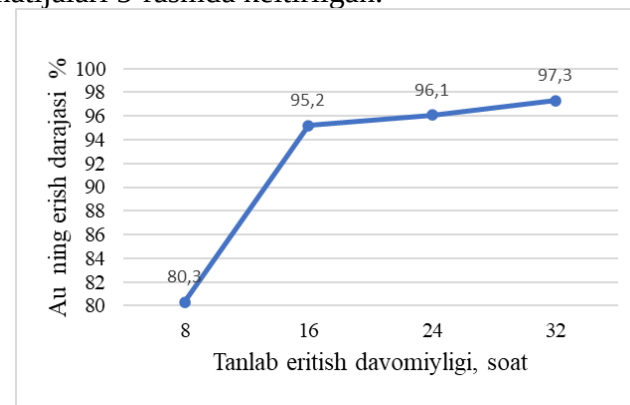
4-rasmda keltirilgan natijalarga ko'ra,

bo'tanadagi qattiq zarralar miqdori oltinni eritmaga o'tkazish darajasiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Bo'tanadagi qattiq zarralar miqdorini 25% dan 40% gacha oshirilganda oltinning eritmaga o'tish darajasi bosqichma-bosqich ortib borishi kuzatildi. 40% bo'lganda oltinning eritmaga o'tish darajasi eng yuqori qiymatga yetib, 96,5% ni tashkil etdi. Biroq 40% dan yuqori bo'lgan hollarda oltinni eritmaga o'tish darajasining pasayishi kuzatildi. Buning sababi bo'tanadagi qattiq zarralar miqdorini ortishi natijasida eritmaning qovushqoqligi oshib, reagent va kislorodning mineral zarrachalari yuzasiga yetib borishi qiyinlashishi, natijada massa almashinuvi va tanlab eritish jarayonining samaradorligi pasayishi bilan izohlanadi. Shunday qilib, o'tkazilgan tajribalar natijalariga asosan, mazkur ruda uchun bo'tanadagi qattiq zarralar optimal miqdorini 40% ekanligi aniqlandi.



4-rasm. Bo'tanadagi qattiq zarralar miqdorini oltinni eritmaga o'tkazish darajasiga ta'siri.

Tanlab eritish vaqtining oltinni eritmaga o'tish darajasiga ta'sirini o'rganildi va bunda tajriba parametrlari o'zgarasdan qoldirildi, faqat tanlab eritish davomiyligi o'zgartirildi. O'tkazilgan sinov natijalari 5-rasmda keltirilgan.



5-rasm. Tanlab eritish davomiyligini oltinni erish

darajasiga ta'siri.

6-jadval

Tekshirish sinovlari natijalari

Namunaning og'irligi, kg	Ruda tarkibidagi oltin miqdori, g/t	Chiqindi tarkibidagi oltin miqdori, g/t	Oltinni eritmaga o'tish darajasi, %
0,8	2,4	0,115	95,2
1,6	2,4	0,118	95,1
2,4	2,4	0,125	94,8

5-rasmda keltirilgan natijalarga ko'ra, tanlab eritish vaqtining 8 soatdan 32 soatgacha oshirilishi oltinning eritmaga o'tish darajasiga ma'lum darajada ta'sir ko'rsatadi. Jarayonning 16-soatida oltinning eritmaga o'tish darajasi 95,2% ni tashkil etgan bo'lsa, 24 soatdan so'ng ushbu ko'rsatkich 96,1% gacha oshgan. Shuning uchun jarayon samaradorligi va iqtisodiy jihatlarni hisobga olgan holda, maqbul tanlab eritish vaqti sifatida 16 soat qabul qilindi.

Natriy sianid va jinchan reagentlarining iqtisodiy samaradorligini qiyosiy baholash maqsadida kapital va ekspluatatsion xarajatlar tahlil qilindi. Dastlabki hisob-kitoblariga ko'ra, natriy sianidning sarfi 300 g/t ni, jinchan reagentining sarfi 350 g/t ni tashkil etadi. Natriy sianidga qaraganda jinchan reagentining narxi 1,2 marta ortiq. Natijalardan ko'rinib turibdiki, jinchan reagentining bir tonnasi uchun bozor narxi natriy sianidga nisbatan yuqoriroq bo'lsa-da, ushbu reagentdan foydalanish zararsizlantirish inshootlarini qurish va chiqindilarni zararsizlantirish bilan bog'liq qo'shimcha kapital hamda ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytiradi. Natijada texnologiyaning umumiy iqtisodiy samaradorligi oshadi.

Xulosalar.

1. O'tkazilgan eksperimental tadqiqotlar natijalariga ko'ra, jinchan reagenti bilan oltinni tanlab eritish uchun quyidagi maqbul texnologik

sharoitlar aniqlandi: rudaning yanchilish darajasi – 0,074 mm bo'lib, ushbu o'lchamdagi zarrachalar ulushi 90 %; bo'tanadagi qattiq zarralar miqdori 40 %; ohak sarfi – 3 kg/t; ishqor bilan dastlabki ishlov berish vaqti – 2 soat; jinchan reagenti sarfi – 350 g/t; tanlab eritish vaqti – 16 soat. Ko'rsatilgan texnologik sharoitlarda oltinning eritmaga o'tish darajasi 95,2 % ga yetdi.

2. Marjonbuloq oltin-kvarsli rudasida o'tkazilgan sinovlar natijalariga ko'ra, jinchan reagenti bilan tanlab eritish texnologiyasi natriy sianid bilan tanlab eritish jarayoniga nisbatan yuqori samaradorlikni namoyon etdi. Xususan, oltinning eritmaga o'tish darajasi deyarli bir xil bo'lgan holda tanlab eritish jarayonining davomiyligi 4 soatga qisqardi.

3. Jinchan reagenti bilan tanlab eritish jarayonidan hosil bo'lgan chiqindilarning toksiklik tahlili natijalari chiqindilar tarkibidagi sianid konsentratsiyasi 0,004 mg/l dan kam ekanligini ko'rsatdi. Bu esa jinchan reagenti bilan tanlab eritish jarayonidan hosil bo'lgan chiqindilarning ekologik xavfsizligi yuqori ekanligini ko'rsatadi. Shu sababli, amaldagi normativ talablarga rioya qilingan holda, bunday chiqindilarni qo'shimcha zararsizlantirish jarayonisiz keyingi joylashtirish yoki qayta ishlash imkoniyati mavjud.

4. O'tkazilgan qiyosiy iqtisodiy tahlil natijalari shuni ko'rsatdiki, jinchan reagenti sarfi natriy sianidga nisbatan biroz yuqori bo'lsa-da, uni zararliligining pastligi, ekologik xavfsizligi va amaldagi gidrometallurgik texnologiyalarga oson joriy etilishi muhim afzallik hisoblanadi. Olingan natijalar jinchan reagentini natriy sianidga ekologik xavfsiz va istiqbolli muqobil reagent sifatida qo'llash mumkinligini ko'rsatdi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Marsden, J., & Haus, I. (2006). The chemistry of gold extraction (2nd ed.). SME.
- [2] Adams, M. D. (2016). Gold ore processing: Project development and operations (2nd ed.). Elsevier.
- [3] Fleming, K. A. (2004). Hydrometallurgy of precious metals recovery. Hydrometallurgy.
- [4] Kenneth, N. H. (1992). Trends and prospects for the development of the leaching method. Raw Metallurgy, (4), 36–42.
- [5] Go, I., et al. (1994). Thiourea leaching of gold ores. Gold Forum on Technology.
- [6] Elmer, D., et al. (2001). Thiosulfate leaching for gold extraction. Minerals Engineering.
- [7] Li, S. S., et al. (2004). Halide leaching technology for gold extraction. Hydrometallurgy.
- [8] Xasanov, A. S., & Sanaqulov, Q. S., va boshqalar. (2010). Rangli metallar metallurgiyasi. Fan.

- [9] Котляр, Ю. А., Меретуков, М. А., & Стрижко, Л. С. (2005). Металлургия благородных металлов (Т. 1, с. 253–263). Руда и металлы.
- [10] Шарипов, Х. Т., Борбат, В. Ф., & Даминова, Ш. Ш. (2018). Химия и технология платиновых металлов (с. 3–40). Университет.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Rahmonova, U. T., Xasanov, A. S., & Saidaxmedov, A. A. (2026). Marjonbuloq koni rudasidan oltinni Jinchan reagenti yordamida tanlab eritishning texnologik samaradorligini natriy sianidi bilan qiyosiy baholash. Sanoatdagi raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.25>

УДК: 622.765

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.26

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ИНТЕНСИВНОСТИ АЭРАЦИИ И СОСТАВА ВОДНОЙ ФАЗЫ НА ГАЗОДИСПЕРСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЛОТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ



Шакаров Тулкин Исмаатович

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлургия черных, цветных и редких металлов», Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», Алмалык, Узбекистан

E-mail: shakarovtulkin@gmail.com

ORCID ID: 0009-0001-7433-9045

Science ID: FTV-1225-0047



Пулатов Хусанхон Аълохонович

Ассистент кафедры «Металлургия черных, цветных и редких металлов», Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», Алмалык, Узбекистан

E-mail: khusankhonp1905@gmail.com

ORCID ID: 0009-0008-5614-1642

Science ID: MTN-1225-0141

Аннотация. Исследовано совместное влияние концентрации пенообразователя, расхода воздуха и состава водной фазы на формирование пенного слоя и средний диаметр пузырьков в модельных флотационных системах. В первом блоке опытов растворы реагента Т-92 концентрацией 0,001-0,010 % аэрировали при расходах 84,8; 138,0 и 328,8 см³/мин. Определяли максимальную высоту пены, время ее образования и разрушения. Во втором блоке оценивали концентрационные зависимости среднего диаметра Заутера d_{32} для пенообразователей Т-92, ПФ-1304 и DF-1012 в дистиллированной и водопроводной воде. Установлено нелинейное усиление пенообразования Т-92 при одновременном повышении концентрации и расхода воздуха. При расходе 328,8 см³/мин увеличение концентрации Т-92 от 0,001 до 0,010% повысило высоту пены с 7 до 35 мм, время образования – с 5 до 40 с, а время разрушения – с 6 до 20 с. Для реагентов Т-92, ПФ-1304 и DF-1012 увеличение концентрации сопровождалось снижением d_{32} . При общей концентрации 0,03 мг/л значения d_{32} в водопроводной воде составили 2,40; 2,07 и 1,99 мм, а в дистиллированной – 1,98; 0,91 и 0,89 мм для Т-92, ПФ-1304 и DF-1012 соответственно. Показано, что действие пенообразователя зависит от состава воды и определяется не только общей концентрацией растворённых солей. Научная новизна работы заключается в совместной количественной оценке влияния расхода воздуха и состава воды на образование пены и размер пузырьков. Для оптимизации флотационного процесса рекомендуется контролировать дозировку пенообразователя, ионный состав оборотной воды и фактический расход воздуха.

Ключевые слова: флотация, пенообразователь, Т-92, ПФ-1304, DF-1012, расход воздуха, состав воды, средний диаметр Заутера, дисперсность пузырьков, коалесценция, устойчивость пены, оборотная вода, газосодержание, реагентный режим.

Received: 05.08.2026

Accepted: 08.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

KO'PIK HOSIL QILUVCHILAR KONSENTRATSIYASI, AERATSIYA JADALLIGI VA SUVLI FAZA TARKIBINING FLOTATSIYA TIZIMINING GAZ-DISPERS XUSUSIYATLARIGA TA'SIRI

Shakarov Tulkin Ismatovich

*Texnika fanlari nomzodi, dotsent, Olmaliq shahridagi "MISIS"
Milliy tadqiqot texnologik universiteti filiali "Qora, rangli va
nodir metallar metallurgiyasi" kafedrası, Olmaliq, O'zbekiston*

Pulatov Xusanxon A'loxonovich

*Assistent, Olmaliq shahridagi "MISIS" Milliy tadqiqot texnologik
universiteti filiali "Qora, rangli va nodir metallar metallurgiyasi"
kafedrası, Olmaliq, O'zbekiston*

Annotatsiya. Ko'pik hosil qiluvchi reagent konsentratsiyasi, havo sarfi va suv fazasi tarkibining model flotatsiya tizimlarida ko'pik qatlaminining shakllanishi hamda pufakchalarning o'rtacha diametriga birgalikdagi ta'siri o'rganildi. Tajribalarning birinchi bosqichida konsentratsiyasi 0,001-0,010% bo'lgan T-92 reagenti eritmalari 84,8; 138,0 va 328,8 sm³/min havo sarflarida aeratsiya qilindi. Ko'pikning maksimal balandligi, uning hosil bo'lish va parchalanish vaqti aniqlandi. Ikkinchi bosqichda T-92, PF-1304 va DF-1012 ko'pik hosil qiluvchi reagentlari uchun distillangan hamda vodoprovod suvida Zauterning o'rtacha diametric – d_{32} ning konsentratsiyaga bog'liqligi baholandi. T-92 reagenti konsentratsiyasi va havo sarfi bir vaqtda oshirilganda ko'pik hosil bo'lishining noxizizqli ravishda kuchayishi aniqlandi. Havo sarfi 328,8 sm³/min bo'lganda T-92 konsentratsiyasining 0,001 dan 0,010 % gacha oshirilishi ko'pik balandligini 7 dan 35 mm gacha, uning hosil bo'lish vaqtini 5 dan 40 s gacha, parchalanish vaqtini esa 6 dan 20 s gacha oshirdi. T-92, PF-1304 va DF-1012 reagentlari konsentratsiyasining oshishi d_{32} qiymatining kamayishi bilan kechdi. Umumiy konsentratsiya 0,03 mg/l bo'lganda T-92, PF-1304 va DF-1012 reagentlari uchun d_{32} qiymatlari vodoprovod suvida mos ravishda 2,40; 2,07 va 1,99 mm ni, distillangan suvda esa 1,98; 0,91 va 0,89 mm ni tashkil etdi. Ko'pik hosil qiluvchi reagentning ta'siri suv tarkibiga bog'liq bo'lib, faqat erigan tuzlarning umumiy konsentratsiyasi bilan belgilanmasligi ko'rsatildi. Ishning ilmiy yangiligi havo sarfi va suv tarkibining ko'pik hosil bo'lishi hamda pufakchalar o'lchamiga ta'sirini birgalikda miqdoriy baholashdan iborat. Flotatsiya jarayonini optimallashtirish uchun ko'pik hosil qiluvchi reagent dozasi, aylanma suvning ion tarkibi va havoning amaldagi sarfini nazorat qilish tavsiya etiladi.

Kalit so'zlar: flotatsiya, ko'pik hosil qiluvchi reagent, T-92, PF-1304, DF-1012, havo sarfi, suv tarkibi, Zauter diametric, pufakchalar dispersligi, koalesensiya, ko'pik barqarorligi, aylanma suv, gaz miqdori, reagent rejimi.

EFFECT OF FOAMING AGENT CONCENTRATION, AERATION INTENSITY, AND AQUEOUS PHASE COMPOSITION ON THE GAS- DISPERSION CHARACTERISTICS OF A FLOTATION SYSTEM

Shakarov Tulkin Ismatovich

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department
of Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and Rare Metals, Almalyk
Branch of NUST MISIS, Almalyk, Uzbekistan*

Pulatov Xusanxon A'lokhonovich

*Assistant, Department of Metallurgy of Ferrous, Non-Ferrous and
Rare Metals, Almalyk Branch of NUST MISIS, Almalyk,
Uzbekistan*

Abstract. The combined effects of frother concentration, air flow rate, and aqueous-phase composition on froth-layer formation and mean bubble diameter in model flotation systems were investigated. In the first series of experiments, T-92 solutions with concentrations ranging from 0.001 to 0.010% were aerated at flow rates of 84.8, 138.0, and 328.8 cm³/min. The maximum froth height, froth formation time, and froth decay time were determined. In the second series, the concentration dependence of the Sauter mean bubble diameter (d_{32}) was evaluated for T-92, PF-1304, and DF-1012 frothers in distilled and tap water. A nonlinear enhancement of the frothing performance of T-92 was observed with the simultaneous increase in frother concentration and air flow rate. At an air flow rate of 328.8 cm³/min, increasing the T-92 concentration from 0.001 to 0.010% increased the froth height from 7 to 35 mm, the froth formation time from 5 to 40 s, and the froth decay time from 6 to 20 s. For T-92, PF-1304, and DF-1012, increasing the frother concentration resulted in a decrease in d_{32} . At a concentration of 0.03 mg/L, the d_{32} values in tap water were 2.40, 2.07, and 1.99 mm, whereas those in distilled water were 1.98, 0.91, and 0.89 mm for T-92, PF-1304, and DF-1012, respectively. The results demonstrate that frother performance depends on water composition and cannot be explained solely by the total concentration of dissolved

salts. The scientific novelty of this study lies in the combined quantitative assessment of the effects of air flow rate and water composition on froth formation and bubble size. To optimize the flotation process, it is recommended to control the frother dosage, the ionic composition of the process water, and the actual air flow rate.

Keywords: froth flotation, frother, T-92, PF-1304, DF-1012, air flow rate, water composition, Sauter mean diameter, bubble dispersion, coalescence, froth stability, recycled water, gas holdup, reagent regime.

Введение. Эффективность флотации зависит не только от гидрофобности минералов, но и от характеристик воздушных пузырьков и пенного слоя. Важное значение имеют размер пузырьков, площадь поверхности контакта между воздухом и жидкостью, содержание воздуха в пульпе и устойчивость пены. Пенообразователь препятствует объединению мелких пузырьков в крупные и влияет на прочность жидких плёнок между ними. Благодаря этому изменяется вероятность столкновения и закрепления минеральных частиц на пузырьках. При недостатке пенообразователя образуются крупные пузырьки разного размера. При слишком высокой дозировке пена становится чрезмерно устойчивой, что может увеличить вынос воды и породных частиц в концентрат.

Свойства пенообразователя нельзя оценивать только по одному показателю. Для его характеристики используют критическую концентрацию коалесценции (ССС), динамический индекс пенообразования, средний диаметр пузырьков по Заутеру и время разрушения пены. На размер и устойчивость пузырьков также влияют собиратели и другие поверхностно-активные вещества, которые не относятся к пенообразователям [1, 2]. Поэтому при лабораторных исследованиях необходимо учитывать не только концентрацию пенообразователя, но и состав жидкой фазы.

Использование оборотной воды на обогатительных фабриках приводит к постоянному изменению её ионного состава. Качество воды влияет на взаимодействие пузырьков с минеральными частицами [3, 4]. При этом различные катионы и анионы могут по-разному изменять устойчивость пены [5]. Увеличение концентрации растворённых солей влияет на поверхностное натяжение, объединение пузырьков, их средний диаметр d_{32}

и устойчивость пенного слоя [6]. Дополнительное влияние оказывает совместное применение пенообразователей и собирателей, от которого зависят свойства пены и скорость закрепления частиц на пузырьках [7, 8]. Исследования с использованием морской и водопроводной воды также показывают, что действие пенообразователя во многом зависит от состава воды [9].

Цель работы – установить количественные закономерности влияния концентрации пенообразователей, расхода воздуха и типа воды на параметры пенного слоя и средний диаметр пузырьков. Для достижения цели решены следующие задачи: исследована кинетика пенообразования Т-92 при трех уровнях аэрации; построены концентрационные зависимости d_{32} для Т-92, ПФ-1304 и DF-1012 в двух водных средах; выполнено сопоставление реагентов при общей концентрации 0,03 мг/л; сформулированы ограничения переноса лабораторных результатов на оборотную воду промышленного объекта.

Материалы и методы исследований. Исследование проводилось нами разработанной установкой для изучения пенообразующих характеристик реагентов пенообразователей, с использованием флотационных пенообразователей Т-92 (оксаль), ПФ-1304 и DF-1012 в дистиллированной воде. Исследуемые концентрации составляли 0,001; 0,002; 0,004 и 0,010 %. Объем раствора – 100 мл. После перемешивания при 1000 мин⁻¹ в течение 4 мин раствор помещали в мерный цилиндр внутренним диаметром 25 мм и высотой 400 мм (рисунок 1). Воздух подавался компрессором через пористый диспергатор. Расход регулировали ротаметром и предварительно калибровали объемным методом; рабочие значения составили 84,8; 138,0 и 328,8 см³/мин. Каждый опыт проводили три раза, а на графиках

представлены средние значения полученных результатов.

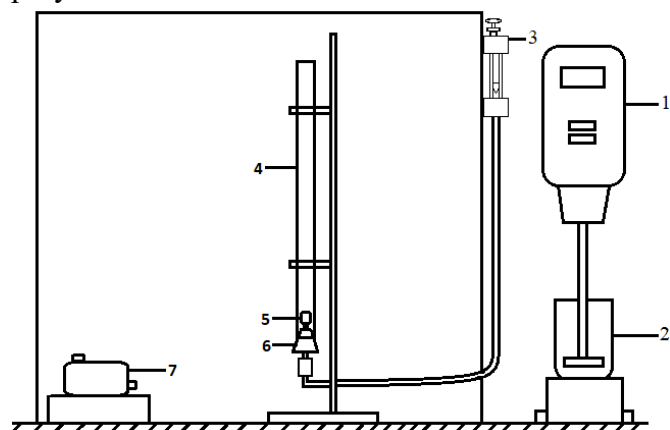


Рис.1. Схема установки для изучения пенообразующих характеристик реагентов пенообразователей:

1 – мешалка; 2 – стакан; 3 – ротаметр; 4 – мерный цилиндр; 5 – диспергатор воздуха; 6 – пробка; 7 – компрессор.

В ходе опытов измеряли максимальную высоту пены, время её образования и продолжительность разрушения. Объём пены рассчитывали с учётом размеров цилиндра. Расход воздуха определяли по времени прохождения контрольного объёма воздуха, равного 40 мл. Расход воздуха рассчитывали по формуле:

$$Q = \frac{V}{t} \cdot 60, \quad V = \frac{\pi D^2 h}{4} \quad (1)$$

Таблица 1.

Измерение расхода воздуха при 40 мл

Шкала ротаметра	Расход воздуха см³/с			Среднее арифметическое см³/с	Расход воздуха см³/мин
10	28,7	28,1	28	28,3	84,8
20	16,5	17,7	17,9	17,4	138
40	7,04	7,33	7,4	7,3	328,8

Во второй серии опытов изучали действие пенообразователей Т-92, ПФ-1304 и DF-1012 в дистиллированной и водопроводной воде. Концентрацию каждого реагента изменяли в пределах, при которых заметно менялся размер пузырьков: 0,001-0,24 мг/л для дистиллированной воды и 0,005-0,16 мг/л для водопроводной. Пузырьки фотографировали рядом с масштабной шкалой, затем по снимкам определяли их размеры и рассчитывали средний диаметр Заутера по формуле:

$$d_{32} = \frac{\sum(n_i d_i^3)}{\sum(n_i d_i^2)} \quad (2)$$

Результаты и их обсуждение. Концентрация Т-92 и расход воздуха одновременно влияли на высоту пены (рисунок 2). При увеличении концентрации Т-92 от 0,001 до 0,010 % высота пены возрастала с 3 до 6 мм при расходе воздуха 84,8 см³/мин, с 5 до 10 мм — при 138,0 см³/мин и с 7 до 35 мм — при 328,8 см³/мин. Наибольшее увеличение наблюдалось при максимальном расходе воздуха: высота пены возросла в 5 раз.

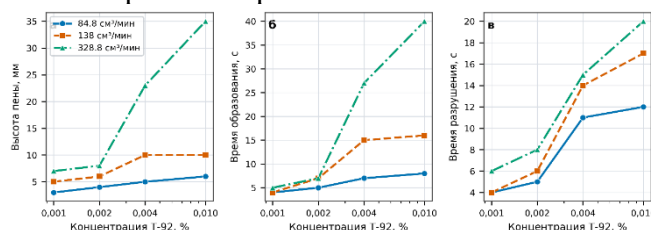


Рис.2. Влияние концентрации Т-92 при различном расходе воздуха:

а – высота пены; б – время образования; в – время разрушения.

При расходе воздуха 328,8 см³/мин увеличение концентрации Т-92 с 0,004 до 0,010% привело к росту высоты пены с 23 до 35 мм. При этом время её образования увеличилось с 27 до 40 с, а время разрушения – с 15 до 20 с. Это означает, что концентрация реагента влияет не только на количество воздуха, удерживаемого в пене, но и на свойства тонких плёнок между пузырьками. Рост концентрации пенообразователей повышает устойчивость пузырьков и препятствует коалесценции. Одновременно увеличение расхода воздуха повышает количество пузырьков и частоту их столкновений. Совместное влияние этих факторов особенно заметно при концентрации выше 0,002%.

Полученные результаты подтверждают существование критической области коалесценции пузырьков (ССС). Однако одного значения критической концентрации недостаточно для полной оценки эффективности пенообразователя [2, 3]. В условиях реальной флотационной пульпы более устойчивая пена может улучшать извлечение тонких частиц. Вместе с тем слишком медленное разрушение пены увеличивает вынос воды и может снизить селективность процесса. Поэтому концентрацию Т-92, равную 0,004%, при высоком

расходе воздуха следует рассматривать как рекомендуемое начальное значение для дальнейших испытаний на минеральной пульпе, а не как окончательно установленный оптимальный режим.

Для реагентов – Т-92, ПФ-1304 и DF-1012 – увеличение концентрации приводило к уменьшению среднего диаметра пузырьков d_{32} . После достижения определённой концентрации размер пузырьков практически не изменялся (рисунок 3).

В дистиллированной воде при использовании ПФ-1304 диаметр пузырьков уменьшился с 2,00 до 0,78-0,81 мм при концентрации 0,045-0,057 мг/л. Реагент DF-1012 обеспечил размер пузырьков 0,84-0,92 мм при концентрации 0,020-0,050 мг/л. При использовании Т-92 близкие значения – 0,91-1,03 мм – были получены только при более высокой концентрации 0,09-0,24 мг/л. В дистиллированной воде ПФ-1304 и DF-1012 эффективнее образовывали мелкие пузырьки при меньшем расходе реагента.

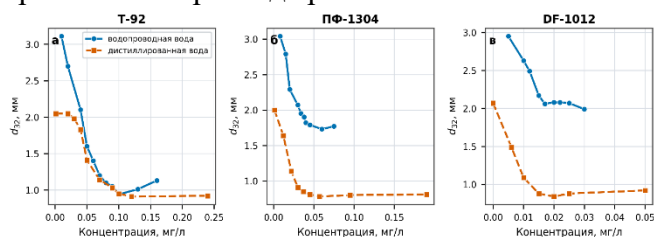


Рис.3. Зависимость среднего диаметра Заутера (d_{32}) от концентрации пенообразователя в водопроводной и дистиллированной воде:
 а – Т-92; б – ПФ-1304; в – DF-1012.

В водопроводной воде изменение размера пузырьков зависело от типа пенообразователя. При использовании Т-92 средний диаметр пузырьков d_{32} уменьшился с 3,11 мм при концентрации 0,01 мг/л до 0,94 мм при 0,10 мг/л, после чего почти не изменялся. Для ПФ-1304 минимальное значение d_{32} , равное 1,73 мм, было получено при концентрации 0,06 мг/л. При использовании DF-1012 диаметр пузырьков составил 1,99 мм при максимальной исследованной концентрации 0,03 мг/л. Полученные различия показывают, что растворённые в воде вещества по-разному

влияют на действие каждого пенообразователя, устойчивость пузырьков и скорость разрушения плёнок между ними.

Таблица 2.
Сопоставление d_{32} при общей концентрации 0,03 мг/л

Пенообразователь	Водопроводная вода, мм	Дистиллированная вода, мм	Отношение $d_{32, \text{вод}} / d_{32, \text{дист}}$
Т-92	2,40	1,98	1,21
ПФ-1304	2,07	0,91	2,27
DF-1012	1,99	0,89	2,24

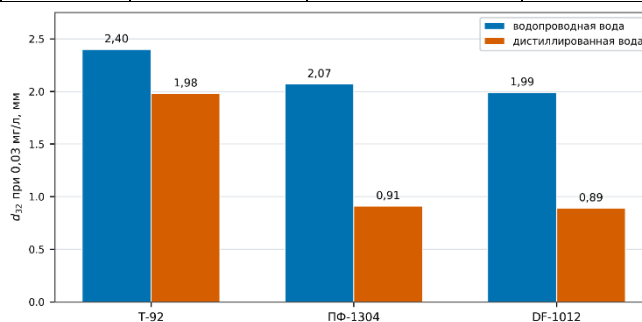


Рис.4. Сопоставление d_{32} при концентрации 0,03 мг/л (значения получены по экспериментальным кривым; для отсутствующих точек применена линейная интерполяция).

При одинаковой концентрации пенообразователей 0,03 мг/л пузырьки в водопроводной воде были крупнее, чем в дистиллированной. Для Т-92 их диаметр увеличился на 21%, для ПФ-1304 – в 2,27 раза, а для DF-1012 – в 2,24 раза (таблица 2; рисунок 4). Поскольку химический состав водопроводной воды не определялся, связать полученный эффект с конкретными ионами невозможно. Однако результаты показывают, что действие пенообразователя заметно зависит от состава воды. Необходимость учитывать влияние растворённых ионов ранее отмечалась при флотации сульфидных руд. Исследования технологии HydroFloat также подтвердили, что концентрация пенообразователя и солёность воды существенно влияют на размер пузырьков [9].

В некоторых условиях растворённые соли повышают устойчивость пены и препятствуют объединению пузырьков. Однако характер их воздействия зависит от вида и концентрации солей, расхода собирателя и свойств пенообразователя. Поэтому образование более

крупных пузырьков в водопроводной воде не противоречит опубликованным данным. Для прогнозирования процесса недостаточно знать только общую минерализацию воды. Необходимо также учитывать её жёсткость, щёлочность, содержание органических примесей и их влияние на адсорбцию реагента. Исследования новых пенообразователей, включая биосовместимые производные витамина Е, показали их взаимодействие с NaCl [10]. Сравнение спиртовых и полигликолевых пенообразователей также подтвердило, что состав воды по-разному влияет на свойства отдельных реагентов [11]. Следовательно, дозировку пенообразователя необходимо подбирать с учётом качества используемой воды.

На практике рекомендуется одновременно контролировать два параметра. Во-первых, необходимо поддерживать стабильный расход воздуха, чтобы не допускать чрезмерного образования устойчивой пены. Во-вторых, дозировку пенообразователя следует корректировать при изменении состава оборотной воды [12]. Применение постоянной дозировки без учёта качества воды может привести к изменению среднего диаметра пузырьков d_{32} более чем в два раза.

Ограничения исследования и направления дальнейших работ. Исследования проводили в модельных системах, состоящих только из воды и воздуха, без добавления минеральных частиц. Поэтому полученные показатели пены нельзя напрямую связывать с извлечением полезного компонента или качеством концентрата. Кроме того, химический состав водопроводной воды не определялся: отсутствуют данные о содержании Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , общей минерализации и растворённом органическом углероде. В исходных данных также не приведены результаты всех трёх повторных опытов для каждого показателя. По этой причине доверительные интервалы и статистическую значимость различий не рассчитывали.

В дальнейшем необходимо провести полный химический анализ воды, измерить динамическое поверхностное натяжение и содержание воздуха в системе, а также определить распределение пузырьков по

размерам. Следующий этап должен включать флотационные опыты с минеральной пульпой и оценку извлечения, содержания полезного компонента в концентрате и выноса воды в пенный продукт. Рекомендуется одновременно изучать влияние типа и концентрации реагента, расхода воздуха и ионного состава воды. Статистическая обработка результатов позволит определить влияние каждого фактора и их совместное действие. Это даст возможность перейти от экспериментального подбора дозировки к более точному и прогнозируемому управлению процессом флотации.

Выводы:

1 Установлено совместное нелинейное влияние концентрации Т-92 и расхода воздуха на высоту, время образования и разрушения пенного слоя. При 328,8 см³/мин повышение концентрации Т-92 с 0,001 до 0,010% увеличило высоту пены в 5 раз – h с 7 до 35 мм.

2 Для пенообразователей – Т-92, ПФ-1304 и DF-1012 – повышение концентрации приводило к уменьшению среднего диаметра Заутера. После достижения определённой концентрации размер пузырьков почти не изменялся, поскольку поверхность раздела воздуха и воды насыщалась молекулами реагента, и объединение пузырьков ограничивалось.

3 При концентрации 0,03 мг/л пузырьки в водопроводной воде были крупнее, чем в дистиллированной: в 1,21 раза для Т-92 и более чем в 2,2 раза для ПФ-1304 и DF-1012. Это показывает, что влияние состава воды зависит от типа применяемого пенообразователя.

4 Для промышленной оптимизации необходимо одновременно контролировать фактический расход воздуха, дозировку пенообразователя и ионный состав оборотной воды. Окончательный выбор реагента и дозировки должен подтверждаться трехфазными испытаниями по извлечению и качеству концентрата.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Wang, J., Forbes, G., & Forbes, E. (2022). Frother characterization using a novel bubble size measurement technique. *Applied Sciences*, 12(2), 750. <https://doi.org/10.3390/app12020750>
- [2] Saavedra Moreno, Y., Bournival, G., & Ata, S. (2022). Classification of flotation frothers—A statistical approach. *Chemical Engineering Science*, 248, 117252. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117252>
- [3] Karakashev, S. I., Grozev, N. A., Ozdemir, O., Batjargal, K., Guven, O., Ata, S., Bournival, G., Boylu, F., & Çelik, M. S. (2021). On the frother's strength and its performance. *Minerals Engineering*, 171, 107093. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107093>
- [4] Pan, Y., Bournival, G., & Ata, S. (2021). The role of non-frothing reagents on bubble size and bubble stability. *Minerals Engineering*, 161, 106652. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106652>
- [5] Pan, Y., Bournival, G., & Ata, S. (2022). Foaming behaviour of frothers in the presence of PAX and salt. *Minerals Engineering*, 178, 107405. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107405>
- [6] Pan, Y., Gresham, I., Bournival, G., Prescott, S., & Ata, S. (2022). Synergistic effects of frothers, collector and salt on bubble stability. *Powder Technology*, 397, 117028. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117028>
- [7] Pan, Y., Bournival, G., Karakashev, S. I., Yang, B., Wang, L., & Ata, S. (2022). Effect of electrolyte and flotation collector on foam films in the presence of frothers. *Chemical Engineering Science*, 264, 118176. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118176>
- [8] October, L. L., Manono, M. S., Wiese, J. G., Schreithofer, N., & Corin, K. C. (2021). Fundamental and flotation techniques assessing the effect of water quality on bubble-particle attachment of chalcopyrite and galena. *Minerals Engineering*, 167, 106880. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106880>
- [9] Manono, M. S., & Corin, K. C. (2022). Considering specific ion effects on froth stability in sulfidic Cu-Ni-PGM ore flotation. *Minerals*, 12(3), 321. <https://doi.org/10.3390/min12030321>
- [10] Gungoren, C., Muse, S. M., Terzi, M., Eskibalci, M. F., Kursun Unver, I., & Ozdemir, O. (2023). Synergistic effect of frequently found ions in the flotation of Pb-Zn sulfide ores on air/water interface. *Minerals*, 13(10), 1236. <https://doi.org/10.3390/min13101236>
- [11] Абрамов, А. А. (2008). Флотационные методы обогащения: Учебник для вузов (3-е изд., перераб. и доп., Т. IV). МГГУ.
- [12] Шакаров, Т. И., & Хасанов, А. С. (2025). Фойдали қазилмаларни бойитиш ва қайта ишлаш асослари: Олий ўқув юртлари учун дарслик. «Мухаррир» нашриёти.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Шакаров, Т. И., & Пулатов, Х. А. (2026). Влияние концентрации пенообразователей, интенсивности аэрации и состава водной фазы на газодисперсные характеристики флотационной системы. *Цифровые технологии в промышленности*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.26>

UDC: 665.775.5

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.27

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

REVIEW OF THE INFLUENCE OF EMULSIFIER TYPES USED IN PRODUCING BITUMEN EMULSIONS ON EMULSION STABILITY



Jumaniyozov Jumaniyoz Shavkat ugli

PhD student at the Department of Chemical Technology, Urgench
State University named after Abu Rayhan Beruni, Urgench,
Uzbekistan

E-mail: jjimaniyoz730@gmail.com

ORCID ID: 0009-0007-9987-1381

Science ID: MXR-0326-0030



Jumaniyazov Maxsud Jabbiyevich

Professor, Department of Chemical Technology, Urgench State
University named after Abu Rayhon Beruni, Urgench, Uzbekistan

E-mail: maxsudjumaniyazov1960@gmail.com

ORCID ID: 0009-0003-1892-5247

Abstract. This article presents a systematic analysis of three types of emulsifiers-cationic, anionic, and nonionic-used in the production of bitumen emulsions, as well as their chemical nature, molecular structure, and the impact of application areas on emulsion stability. The article separately considers the influence of such factors as emulsifier type, concentration, pH of the medium, droplet size, and zeta potential on stability, as well as the mechanism of action of cetyltrimethylammonium chloride (CTAC) and octadecylamine hydrochloride ($C_{18}H_{37}NH_2 \cdot HCl$), which belong to the class of cationic emulsifiers, sodium oleate as an anionic emulsifier, and nonionic emulsifiers based on the hydrophilic-lipophilic balance (HLB) theory. The results show that cationic emulsifiers provide the best stability in a low-acid environment (pH 2-5), and anionic emulsifiers are compatible with limestone aggregates. In contrast, nonionic emulsifiers are suitable for long-term storage. Bio-based emulsifiers-in particular, cationic lignin-based ones-are preferred.

Keywords: bitumen emulsion, cationic emulsifier, anionic emulsifier, nonionic emulsifier, CTAC, sodium oleate, stability, surfactant, droplet size, zeta potential, HLB.

Received: 10.08.2026

Accepted: 09.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ОБЗОР ВЛИЯНИЯ ТИПОВ ЭМУЛЬГАТОРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БИТУМНЫХ ЭМУЛЬСИЙ, НА ИХ СТАБИЛЬНОСТЬ

Жуманиёзов Жуманиёз Шавкативич

Докторант кафедры химической технологии Ургенчского
государственного университета имени Абу Райхана Беруни,
Ургенч, Узбекистан

Жуманиязов Махсуд Джаббиевич

Профессор кафедры химической технологии Ургенчского
государственного университета имени Абу Райхана Беруни,
Ургенч, Узбекистан

Аннотация. В данной статье представлен систематический анализ трех типов эмульгаторов: катионных, анионных и неионных, используемых при производстве битумных эмульсий, а также их химической природы, молекулярной структуры и влияния областей применения на стабильность эмульсии. В статье отдельно рассматривается влияние таких факторов, как тип эмульгатора, концентрация, pH среды, размер капель и зета-потенциал, на стабильность, а также механизм действия цетилтриметиламмонийхлорида (СТАС) и октадециламингидрохлорида ($C_{18}H_{37}NH_2 \cdot HCl$), относящихся к классу катионных эмульгаторов, олеата натрия как анионного эмульгатора и неионных эмульгаторов на основе

теории гидрофильно-липофильного баланса (ГЛБ). Результаты показывают, что катионные эмульгаторы обеспечивают наилучшую стабильность в низкокислой среде (pH 2-5), а анионные эмульгаторы совместимы с известковыми агрегатами. В отличие от них, неионные эмульгаторы подходят для длительного хранения. Предпочтительны эмульгаторы на биологической основе, в частности, на основе катионного лигнина.

Ключевые слова: битумная эмульсия, катионный эмульгатор, анионный эмульгатор, неионный эмульгатор, CTAC, олеат натрия, стабильность, ПАВ, размер капель, зета-потенциал, HLB.

BITUM EMULSIYALARINI ISHLAB CHIQRISHDA QO‘LLANILADIGAN EMULGATOR TURLARINING BARQARORLIKKA TA’SIRI TAHLILI

Jumaniyozov Jumaniyoz Shavkat o‘g‘li

Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti
Kimyoviy texnologiya kafedrası doktoranti, Urganch, O‘zbekiston

Jumaniyozov Maxsud Jabbiyevich

Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti
Kimyoviy texnologiya kafedrası professori, Urganch, O‘zbekiston

Annotatsiya. Mazkur maqolada bitum emulsiyalarini ishlab chiqarishda qo‘llaniladigan uch turdagi: kationli, anionli va noionli emulgatorlar, shuningdek, ularning kimyoviy tabiati, molekulyar tuzilishi hamda qo‘llanilish sohalarining emulsiya barqarorligiga ta’siri tizimli tahlil qilingan. Maqolada emulgator turi, konsentratsiyasi, muhitning rH ko‘rsatkichi, tomchilar o‘lchami va dzeta-potensial kabi omillarning emulsiya barqarorligiga ta’siri alohida ko‘rib chiqilgan. Shuningdek, kationli emulgatorlar sinfiga mansub setiltrimetilammoniy xlorid (CTAC) va oktadetsilamin gidroxlorid (C18H37NH2·HCl), anionli emulgator sifatida natriy oleati hamda gidrofil-lipofil muvozanat (GLM) nazariyasiga asoslangan noionli emulgatorlarning ta’sir mexanizmi tahlil etilgan. Natijalar kationli emulsifikatorlarning kuchsiz kislotali muhitda (pH 2–5) eng yaxshi barqarorlikni ta’minlashini, anionli emulsifikatorlarning esa ohakli to‘ldirgichlar bilan mos kelishini ko‘rsatadi. Ulardan farqli o‘laroq, noionogen emulsifikatorlar uzoq muddatli saqlash uchun yaroqlidir. Bioasosli, xususan, kationli lignin asosidagi emulsifikatorlarga afzallik beriladi.

Kalit so‘zlar: bitum emulsiyasi, kationli emulsifikator, anionli emulsifikator, noionogen emulsifikator, CTAC, natriy oleat, barqarorlik, SAM, tomchi o‘lchami, dzeta-potensial, HLB.

Introduction. Bitumen emulsions are an environmentally friendly material widely used in modern road construction, which retains bitumen in an aqueous medium in the form of tiny droplets. Compared to traditional hot mix asphalt concrete, bitumen emulsions consume 40-50% less energy, have a low fire hazard, and minimize harmful hydrocarbon emissions into the atmosphere [1]. The main component of the emulsion-the emulsifier (surfactant)-plays a crucial role in maintaining the stability of bitumen droplets in an aqueous medium.

Emulsifiers are divided into three main types: cationic, anionic, and nonionic. This classification is based on the ionic charge formed during the dissociation of the surfactant molecule in an aqueous medium [2]. The correct choice of emulsifier determines such important properties of the emulsion as its storage stability, droplet size distribution, adhesion to the aggregate, and suitability for the intended application [3].

Over the past decade, significant advances have been made in the field of emulsifier chemistry, with lignin-based bioemulsifiers, polymer-modified surfactants, cetyl ion-based cationic surfactants (CTAC, cetylpyridinium chloride), and nanocellulose-based stabilizers being the focus of research [4, 5, 19]. At the same time, the hydrophilic-lipophilic balance (HLB) theory is being revised to more accurately explain the mechanism of action of non-ionic emulsifiers [20]. Despite this, systematic review studies that would comparatively analyze the effects of different types of emulsifiers, their chemical nature, and concentration on stability are lacking. The aim of this article is to determine the effects of the type, chemical nature, and concentration of emulsifier on the stability of bitumen emulsion based on an analysis of scientific literature.

Materials and Methods. Materials used in the study. In the analyzed articles, different grades

of bitumen were used as the base material. Most of the studies used bitumen with 60/90 and 90/130 penetration [7, 10]. Representatives of three main classes were taken as emulsifiers: cationic emulsifiers (propylene alkyl polyamine - CSS-1h [3, 7, 10], didodesyl dimethyl ammonium bromide [2], amino-functionalized product based on kraft lignin [4, 5, 6]); anionic emulsifiers (2-bromostearic acid [2], dodecacyl sulfate derivatives, sodium oleate [13]); polyethylene glycol (PEG) [2] and nanocellulose crystals [8] were tested as non-ionic emulsifiers. In the study by Sidun et al. [9] Commercial cationic emulsifiers Redicote C-320E and Polyram L950 were tested on Ukrainian and Polish bitumens. Geng et al. [11] prepared a complex modified emulsion by adding a rejuvenator and SBR latex to the cationic emulsifier.

Cetyltrimethylammonium chloride (CTAC). Among the long-chain quaternary ammonium salts, cetyltrimethylammonium chloride (CTAC, $C_{19}H_{42}ClN$), a cationic surfactant with a hexadecyl radical, occupies an important place in bitumen emulsions. In a study by Yang et al., the "cetyl ion" of emulsified asphalt systems based on CTAC, cetylpyridinium chloride (CPC), sodium hexadecyl sulfate (SHS), and sodium hexadecyl sulfonate (SHSN) was compared with molecular dynamics (MD) simulations and experimental methods. The results showed that the electrostatic interaction between emulsifier molecules and bitumen is stronger than the van der Waals interaction between emulsifier molecules and water, and the interface stability mainly depends on the electrostatic force; According to the thickness of the interactive layer, emulsifiers decrease in the order $SHS > SHSN > CPC > CTAC$, that is, CTAC forms a thinner layer, but with a strong electrostatic effect [19].

Octadecylamine hydrochloride ($C_{18}H_{37}NH_2 \cdot HCl$). The classic class of cationic emulsifiers for bitumen emulsions consists of hydrochloride salts of long-chain primary fatty amines-in particular, octadecylamine hydrochloride. In a review by Al-Mohammedawi and colleagues, such amine salts (octadecylamine, laurylamine, N-methylstearylamine) are described as the main group of cationic emulsifiers used in the manufacture of bitumen emulsions. These compounds, dissolved in the aqueous phase, are protonated by acid (usually hydrochloric acid),

forming a positively charged amine head with a long hydrocarbon chain; this provides strong electrostatic attraction to the surface of the negatively charged silicate (granite) aggregate and imparts high adhesive properties in cold mixes. In industrial practice, such amine salts are usually used in amounts of 0.1-2.0 wt.% at pH in the range of 2-5 [1].

Sodium Oleate. Among the anionic emulsifiers, sodium oleate (sodium salt of oleic acid, $C_{17}H_{33}COONa$) is of practical importance. Antonova et al. studied the effect of sodium oleate concentration on the stability of anionic bitumen emulsions used for waterproofing purposes. The results showed that at an emulsifier concentration of about 3%, a minimum sieve residue (i.e., the best homogeneity and dispersibility) is observed, which is consistent with the results of tests after 7 and 30 days of storage; the dependence of the relative viscosity of the emulsion on the emulsifier concentration was also established. Sodium oleate is obtained by neutralizing technical oleic acid with sodium hydroxide and works actively in an alkaline environment (pH 8-10), which allows for compatible work with limestone (carbonate) aggregates [13].

Non-ionic emulsifiers and hydrophilic-lipophilic balance theory. The stabilizing mechanism of non-ionic emulsifiers, in contrast to electrostatic charge, is related to the value of hydrophilic-lipophilic balance and the steric barrier mechanism. The revised hydrophilic-lipophilic theory proposed by Yan et al. showed that an aqueous solution of bitumen emulsifiers provides more accurate results in predicting the surface tension than the classical hydrophilic-lipophilic model [20]. This helps to explain the ability of polyethylene glycol derivatives and other ethoxylated non-ionic surfactants to stably retain bitumen droplets regardless of ionic strength; however, such emulsifiers are weaker in adhesion to the aggregate than cationic emulsifiers [2].

Emulsion preparation methods. All emulsions in the analyzed papers were prepared by the colloid mill method, in which heated bitumen (110-160°C) and the dissolved aqueous phase of the emulsifier are mixed using high shear force. The emulsifier was usually added to the aqueous phase by dissolution at a temperature of 40-60°C [1, 3]. In

the study by You, bitumen was prepared by adding HCl and NaOH solutions to emulsions at different pH values (1.0-12.0), while the bitumen content was retained at 60% [3]. Porto prepared a bio-surfactant-based emulsion using a colloid mill at a speed of 1000-6000 rpm; the emulsifier proportion was 1-6% of the total emulsion weight and maintained at pH-14 [12].

Methods and Standards for Stability Assessment. The following methods and international standards were used in the reviewed articles to assess stability; these standards form the methodological basis for the numerical values presented in Tables 1-3.

Storage stability: the sieve residue was determined by sieving (DSTU B V.2.7-129:2013 and European standard EN 12847 0.14 mm and 0.5 mm sieve) after 7 and 30 days of storage [9, 13]; sedimentation tendency was measured as the difference in the amount of water in the lower and upper layers of the emulsion [9]. In US practice, storage stability is often assessed according to ASTM D6930 (24-hour static sedimentation). The particle charge type (determination of cationic or anionic) is determined by electrophoresis in accordance with standard EN 1428 [16, 18].

Table 1

An extended comparative description of the three main types of emulsifiers

Indicator	Cationic	Anionic	Nonionic	Standard	Ref.
Charging	Positive (+)	Negative (-)	Neutral (0)	EN 1428	[2]
pH of the environment	Acidic (2-5)	Alkaline (8-12)	Neutral (6-8)	pH-metry	[3]
Stability period	3-6 months	2-4 months	6-12 months	EN 12847 / ASTM D6930	[1]
CMC concentration	0.5-1.5 wt. %	0.8-2.0 wt. %	1.0-2.5 wt. %	Surface tension/HLB	[1]; [20]
Aggregate compatibility	Granite	Limestone	Universal	Zeta-potential + SFE	[2]; [18]
Processing temperature	110-150°C	120-160°C	100-140°C	-	[3]
Typical representatives	CSS-1h, CTAC, C ₁₈ H ₃₇ NH ₂ ·HCl, cationic lignin	Sodium oleate, dodecyl sulfate, alkali lignin	PEG, nanocellulose, ethoxylated alcohols	-	[21]; [13]
Scope	Cold mix, tack coat, chip seal	Waterproofing, limestone aggregate	Special industrial coatings	-	[4]

Droplet size and distribution: D50 and D90 values were determined by laser diffractometry [4, 7, 8, 19]; electron microscopy (EM) was used in some studies to confirm droplet morphology. **Zeta potential:** the electrostatic charge on the droplet surface was measured by electrophoretic light [1, 4, 14, 16, 18] using the Smoluchowski equation;

according to the literature, a zeta potential with an absolute value above 30 mV is an indication of a stable colloidal system [14].

Results. General characteristics of the selected sources. The physicochemical and technological characteristics of the three main types of emulsifiers, as well as the standards used to measure them, are summarized in Table 1.

Emulsifiers and stability. Cationic emulsifiers are the most common type in bitumen emulsions, imparting a positive charge to bitumen droplets. The effect of pH on stability and rheology was studied by modifying a cationic, slowly breaking emulsion with HCl and NaOH solutions. This study demonstrated a significant improvement in the storage stability of the emulsion at pH 2.5-4.0 [3].

Among recent studies, the molecular dynamics analysis by Yan et al. is particularly significant: they compared "cetyl ionic" emulsions based on CTAC, cetylpyridinium chloride (CPC), hexadecyl sulfate (SHS), and hexadecyl sulfonate (SHSN), confirming the primary role of electrostatic action in interface stability [19]. This result is also true for classical amine salts such as octadecylamine hydrochloride: the long hydrocarbon chain penetrates the bitumen phase and the positively charged amine head forms an electrostatic barrier at the water-bitumen interface [1].

Anionic emulsifiers impart a negative charge to bitumen droplets. Razali compared the properties of emulsified modified bitumen prepared using three types of emulsifiers: 2-bromostearic acid (anionic), didodesyl dimethyl ammonium bromide (cationic), and polyethylene glycol (non-ionic). The anionic emulsifier demonstrated superior stability, releasing only 1.67% water, while the cationic emulsifier provided the fastest drying time (8 hours) [2].

Studies using sodium oleate showed that the stability of anionic bitumen emulsions for waterproofing purposes was greatest at the optimum emulsifier concentration [13]; this result confirms the general pattern that stability is maximized at emulsifier concentrations near the CMC.

Non-ionic emulsifiers stabilize emulsions through a steric barrier mechanism rather than electrostatic stabilization. This mechanism offers advantages during long-term storage due to its low

sensitivity to ionic strength [2].

Kraft lignin chemically modified by the Mannich reaction and bioethanol lignin were used as cationic emulsifiers in bitumen emulsions. Cationic kraft lignin effectively stabilized a 60% bitumen-containing emulsion at a concentration of 0.25-0.75%, at a pH of 13, while maintaining a droplet size of approximately 4.5 μm [4]. Furthermore, Losa tested nanocellulose crystals as an emulsifier, proving them to be a viable alternative to commercial emulsifiers [8].

The results showed that the type of emulsifier significantly affects the storage stability and degree of dispersion of the bitumen.

Comparative analysis of emulsifier concentration and stability parameters.

Table 2

Bitumen emulsion stability parameters for different emulsifier types and concentrations

Emulsifier Type	Concentration (wt%)	pH	Droplet size (μm)	Storage stability (day)	Zeta potential (mV)
Cationic (amen)	1.0	3.5	5.2	>90	+35 $\pm$ 3
Cationic (amen)	1.5	3.5	3.8	>120	+48 $\pm$ 4
Anionic (fatty acid)	1.0	9.5	6.8	60-75	-32 $\pm$ 4
Anionic (fatty acid)	1.5	9.5	5.1	75-90	-45 $\pm$ 5
Non-ionic (PEG)	2.0	7.0	7.4	>180	$\approx$ 0
Cationic lignin	0.5	13.0	4.5	>150	+28 $\pm$ 5

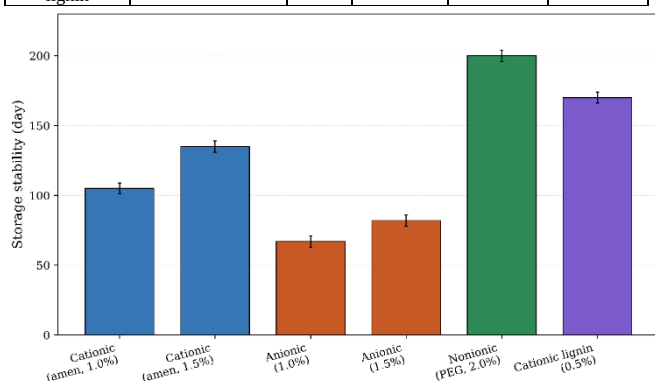


Fig.1. Shelf life of bitumen emulsion depending on the type and concentration of emulsifier.

As can be seen from Table 2, increasing the cationic emulsifier concentration from 1.0 to 1.5 wt.% leads to an increase in the zeta potential from +35 to +48 mV and an increase in shelf life from 90 to 120 days. The nonionic emulsifier provides stability for over 180 days, but the adhesive forces are low due to the zeta potential being close to zero.

The cationic lignin emulsifier provided stability for over 150 days at a relatively low concentration of 0.5 wt.% and a high pH of 13 with a positive zeta potential of 28 mV. The following diagrams (Fig. 1 and Fig. 2) visually illustrate this relationship.

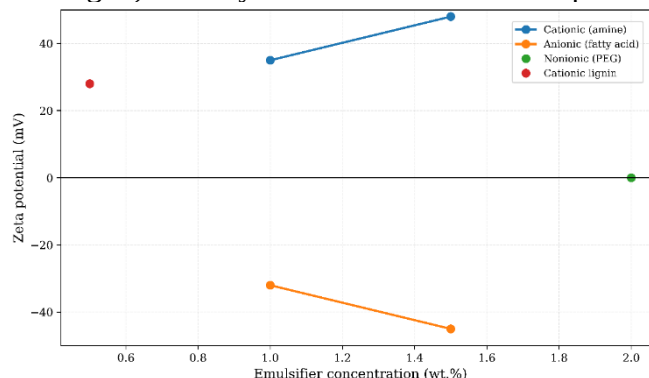


Fig.2. Effect of emulsifier type and concentration on zeta potential.

Advantages and Applications of Emulsifiers. The technological advantages, disadvantages, and practical applications of the three types of emulsifiers are summarized in Table 3. This classification is used to select the most appropriate emulsifier type for specific construction conditions (unit type, climate, repair timeframe) at the design stage.

Table 3

Advantages, Disadvantages, and Applications of Emulsifiers

Emulsifier Type	Advantages	Disadvantages	Main areas of application	Ref.
Cationic	Strong adhesion to silicate aggregates; fast drying (approximately 8 hours)	low pH; some amine salts irritate skin and eyes; relatively high price	Cold mixes, tack coat, chip seal (closed coating), PMBE (polymer-modified emulsion)	[1]; [2]
Anionic	Relatively inexpensive; well compatible with carbonate aggregates; low toxicity	Stability period is shorter (2-4 months); when mixed with cement, it may delay hydration.	Waterproofing coatings, road construction in limestone regions, CA (cement-bitumen) mortar	[13]; [21]; [22]
Non-ionic	Longest shelf life stability (>180 days); low sensitivity to ionic strength and electrolytes.	Weak adhesion to the aggregate (zeta potential $\approx$ 0); high cost.	Special industrial coatings, long-term storage emulsions, mixed (complex) formulas	[2]; [20]

Discussion. The reviewed sources confirm a general trend: the type, chemical nature, and concentration of the emulsifier are the most important factors affecting the stability of bitumen emulsions. Cationic emulsifiers remain the most

common type for road construction, as their positively charged droplets are electrostatically attracted to the negative surface charge of most silicate aggregates [2, 3].

Sidun's study showed that the type of acid used in the preparation of cationic emulsions-HCl and H_3PO_4 -has a significant impact on storage stability. Emulsions prepared with HCl showed superior results in screening stability and sedimentation tendency compared to H_3PO_4 [9]. This result further emphasizes the importance of acid selection for cationic emulsifiers.

The electrochemical approach based on zeta potential and surface free energy has become the leading method for assessing emulsion stability in recent years. While Pinto and Buss demonstrated that zeta potential is a reliable quantitative measure of asphalt emulsion stability [14], Cuaran-Cuaran extended this approach to assessing electrochemical interactions with aggregate [18]. Meanwhile, Yang confirmed the electrostatic superiority of cationic surfactants such as CTAC in interface stability at the microscopic level using molecular dynamics simulations [19], allowing us to link macroscopic zeta potential measurements to the molecular mechanism.

Conclusion. This systematic review led to the following key findings across emulsifier types.

Cationic emulsifiers. Cationic emulsifiers such as CSS-1h, CTAC, and octadecylamine hydrochloride provide the highest stability and adhesion properties for materials used in acidic environments with a pH of 2-5 and in combination with silicate aggregates. Their superiority is explained by the mechanism of electrostatic attraction, and stability is further enhanced at

concentrations above the SMC of 1.0-1.5 wt%.

Anionic emulsifiers. Anionic emulsifiers based on sodium oleate and other fatty acid salts are preferred for limestone-based aggregates and waterproofing applications. An optimal concentration (~3% for sodium oleate) significantly improves stability; however, they require careful hydration when mixed with cement.

Non-ionic emulsifiers. Non-ionic emulsifiers, such as PEG derivatives, provide the longest shelf stability, i.e., over 180 days, due to steric stabilization, but have weaker adhesion to aggregates than cationic emulsifiers and are used in specialized industrial construction.

Bioemulsifiers. Lignin- and nanocellulose-based bioemulsifiers have the potential to become a worthy alternative to traditional chemical emulsifiers: cationic kraft lignin exhibits effective stabilizing properties at levels of 0.25-0.75%.

Furthermore, the production method for polymer-modified bitumen emulsions, along with the type of emulsifier, significantly impacts shelf stability and mechanical properties. Cationic emulsions prepared with HCl acid have superior shelf stability to H_3PO_4 -based emulsions, and the choice of acid type is also an important parameter.

Assessing the future industrial performance of bioemulsifiers. Of current importance are studies aimed at more deeply understanding the molecular mechanisms of cationic surfactants such as CTAC and octadecylamine hydrochloride, analyzing their long-term stability under various climatic conditions, and optimizing emulsifier formulations using HLB theory and numerical modeling methods.

REFERENCES

- [1] Al-Mohammedawi, A., & Mollenhauer, K. (2022). Current research and challenges in bitumen emulsion manufacturing and its properties. *Materials*, 15(6), 2026. <https://doi.org/10.3390/ma15062026>
- [2] Razali, M. N., Md Hadun, H. S., Nour, A. H., Mohd Ramli, N., & Mohd Zuhan, M. K. N. (2024). Performance test of emulsifiers for bitumen emulsion mixture. In *Intelligent manufacturing and mechatronics* (Springer Proceedings in Materials, Vol. 40). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9848-7_39
- [3] You, L., Dai, Q., You, Z., Zhou, X., & Washko, S. (2020). Stability and rheology of asphalt-emulsion under varying acidic and alkaline levels. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120417. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120417>

- [4] Yuliestyan, A., Partal, P., Navarro, F. J., Martín-Sampedro, R., Ibarra, D., & Eugenio, M. E. (2022). Emulsion stabilization by cationic lignin surfactants derived from bioethanol production and kraft pulping processes. *Polymers*, 14(14), 2879.
- [5] Yuliestyan, A., García-Morales, M., Moreno, E., Carrera, V., & Partal, P. (2017). Assessment of modified lignin cationic emulsifier for bitumen emulsions used in road paving. *Materials & Design*, 131, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.024>
- [6] Yuliestyan, A., Gabet, T., Marsac, P., García-Morales, M., & Partal, P. (2018). Sustainable asphalt mixes manufactured with reclaimed asphalt and modified-lignin-stabilized bitumen emulsions. *Construction and Building Materials*, 173, 662–671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.044>
- [7] Eftekhari, H., Bayat, A., Habibpour, R., & Eftekhari, N. (2021). Effect of emulsifying agent on rheological properties of bitumen emulsion modified with different techniques of adding SBR latex polymer. *Road Materials and Pavement Design*, 23(3), 665–685. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1835695>
- [8] Losa, G., Margaritis, A., Kanellopoulos, N., & Pell, A. (2023). Laboratory and field performances of grave emulsion manufactured using nanocellulose crystals as an asphalt-emulsion emulsifier. *Road Materials and Pavement Design*, 25(3), 492–510. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2216305>
- [9] Sidun, I., Bidos, V., Teshchyshyn, N., & Kalmuk, M. (2025). Storage stability of cationic bitumen emulsions. *Theory and Building Practice*. <https://doi.org/10.23939/jtbp2025.01.089>
- [10] Eftekhari, H., Bayat, A., Habibpour, R., & Eftekhari, N. (2021). Effect of polymer modified bitumen emulsion production method on the durability of recycled asphalt mixture in the presence of deicing agents. *Construction and Building Materials*, 311, 125244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125244>
- [11] Geng, L., Liu, Y., Li, X., & Li, Y. (2022). Preparation and performance evaluation of emulsified asphalt with rejuvenator and latex for pavement seal coat. *Construction and Building Materials*, 318, 125997. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125997>
- [12] Aprea, P., Lirer, F., Mangoni, M., Vilardo, M., Caputo, P., & Oliviero Rossi, C. (2021). Stability of bituminous emulsion induced by waste-based bio-surfactant. *Applied Sciences*, 11(7), 3280. <https://doi.org/10.3390/app11073280>
- [13] Antonova, I., & Ayupov, D. (2021). Anionic bitumen emulsions for waterproofing. *E3S Web of Conferences*, 274, 04007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127404007>
- [14] Pinto, I., & Buss, A. (2020). ζ potential as a measure of asphalt emulsion stability. *Energy & Fuels*, 34(2), 2143–2151. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03565>
- [15] Querol, N., Barreneche, C., & Cabeza, L. F. (2017). Storage stability of bimodal emulsions vs. monomodal emulsions. *Applied Sciences*, 7(12), 1267. <https://doi.org/10.3390/app7121267>
- [16] Jada, A., Florentin, C., & Mariotti, S. (2004). Study of the electrical properties of cationic bitumen emulsions by microelectrophoresis. *Advances in Colloid and Interface Science*, 108–109, 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2003.10.006>
- [17] Salou, M., Siffert, B., & Jada, A. (1998). Interfacial characteristics of petroleum bitumens in contact with acid water. *Fuel*, 77(4), 343–346. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(97\)00207-X](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(97)00207-X)
- [18] Cuaran-Cuaran, Z. I., Castilla-Barbosa, M., Rincón, O., & Ocampo-Terreros, M. (2024). Evaluation of the electrochemical interaction in the asphalt emulsion-aggregate system of cold mix asphalt through zeta potential and surface free energy analysis. *International Journal of Pavement Engineering*, 25(1), Article 2361837. <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2361837>
- [19] Yang, Z., Jiang, C., Xiang, Q., Wu, J., Li, J., Cao, Z., & Xiao, F. (2025). Probing the stability of emulsified asphalts: A dual analysis of zeta potential and particle size. *Fuel*, 396, 135266. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135266>

- [20] Yan, Z., Tian, Y., Hu, J., Yao, Z., & Fuller, G. G. (2025). Revising HLB theory for surface tension prediction of the aqueous solution of asphalt emulsifiers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 715, 136663. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136663>
- [21] Peng, Y., Miao, J., Yu, X., Yang, Y., Yang, Q., Kong, L., Wang, W., Chen, Y., Liang, F., & Ao, T. (2024). The effect of anionic emulsifiers' diversity and manufacturing processes on the stability and mechanical properties of the water-based epoxy-emulsified asphalt. *Scientific Reports*, 14, 22268. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73009-3>
- [22] Zhang, P., Hou, Y., Niu, K., Tian, B., & Wang, H. (2023). Effects of anionic emulsifiers and emulsified asphalt on hydration and microstructure of cement. *Materials*, 17(1), 36. <https://doi.org/10.3390/ma17010036>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Jumaniyozov, J. S., & Jumaniyazov, M. J. (2026). Review of the influence of emulsifier types used in producing bitumen emulsions on emulsion stability. *Digital Technologies in Industry*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.27>

UDC: 621.311:621.317.3

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.29

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

K₂U-NODE: DESIGN AND VALIDATION METHODOLOGY OF AN OPEN-SOURCE TWO-GENERATION DEVICE FOR THREE-PHASE VOLTAGE-UNBALANCE MONITORING



Sherbaev Javokhir

PhD Student, Jizzakh Branch of the National University of
Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Jizzakh, Uzbekistan
E-mail: javokhirsherbaev@gmail.com
ORCID ID: 0009-0009-9351-3318
Science ID: FTN-0826-0078



Abdumalikov Akmal

Associate Professor, Jizzakh Branch of the National University of
Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Jizzakh, Uzbekistan
E-mail: akmalabdumalikov6@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-5432-8632
Science ID: FJZ-0525-0056

Abstract. This article presents the design and validation methodology of the open-source two-generation K₂U-Node device intended for voltage-unbalance monitoring in three-phase electrical networks. The theoretical limitations of determining the negative-sequence voltage unbalance factor (K_2U) using only phase-voltage RMS magnitudes are analyzed. The Gen-1 device, based on an ESP32 and three PZEM-004T v3.0 modules, is proposed for preliminary screening and distributed monitoring of voltage unbalance. The Gen-2 device, based on the ATM90E32AS metering IC, measures both voltage magnitudes and phase angles, enabling calculation of the complex symmetrical components and the K_2U factor. Numerical examples demonstrate that angular unbalance can produce a significant K_2U value even when all phase-voltage magnitudes are equal. A three-stage calibration and validation methodology is proposed, together with 10-minute aggregation of measurement results in accordance with GOST 32144-2013 and IEC 61000-4-30 requirements. The proposed solution provides a promising basis for multi-point power-quality monitoring, identification of voltage-unbalance sources, and technical assessment of distributed energy facilities.

Keywords: voltage unbalance, negative-sequence voltage unbalance factor, K_2U , three-phase electrical network, ESP32, PZEM-004T, ATM90E32AS, symmetrical components, power quality, open-source device, monitoring, GOST 32144-2013, IEC 61000-4-30.

Received: 15.08.2026

Accepted: 13.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

K₂U-NODE: ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МЕТОДИКА ВАЛИДАЦИИ ДВУХПОКОЛЕННОГО УСТРОЙСТВА С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ ДЛЯ МОНИТОРИНГА НЕСИММЕТРИИ ТРЁХФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Шербаев Джавохир Равшан угли

Докторант (PhD), Джизакский филиал Национального
университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Джизак,
Узбекистан

Абдумаликов Акмалжон Абдухолик угли

Доцент, Джизакский филиал Национального университета
Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Джизак, Узбекистан

Аннотация. В статье представлена методика разработки и валидации двухпоколенного устройства с открытым исходным кодом K2U-Node, предназначенного для мониторинга несимметрии напряжений в трёхфазных электрических сетях. Проанализированы теоретические ограничения определения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_2U) только по действующим значениям фазных напряжений. Устройство Gen-1 на базе ESP32 и трёх модулей PZEM-004T v3.0 предложено для предварительного скрининга и распределённого мониторинга несимметрии напряжений. В устройстве Gen-2 на базе микросхемы ATM90E32AS реализовано измерение амплитуд и фазовых углов напряжений, позволяющее вычислять комплексные симметричные составляющие и коэффициент K_2U . Расчётные примеры показывают, что даже при одинаковых амплитудах фазных напряжений угловая несимметрия может приводить к значительному значению K_2U . Разработана трёхэтапная методика калибровки и валидации устройства, а также реализованы принципы 10-минутного агрегирования результатов измерений в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 и IEC 61000-4-30. Предлагаемое решение является перспективным для многоточечного мониторинга качества электроэнергии, выявления источников несимметрии и оценки технического состояния объектов распределённой энергетики.

Ключевые слова: несимметрия напряжений, коэффициент обратной последовательности, K_2U , трёхфазная электрическая сеть, ESP32, PZEM-004T, ATM90E32AS, симметричные составляющие, качество электроэнергии, устройство с открытым исходным кодом, мониторинг, ГОСТ 32144-2013, IEC 61000-4-30.

K₂U-NODE: UCH FAZALI KUCHLANISHLAR NOSIMMETRIKLIGINI MONITORING QILISH UCHUN OCHIQ KODLI IKKI AVLODDAN IBORAT QURILMANI LOYIHALASH VA VALIDATSIYA METODIKASI

Sherbaev Javokhir Ravshan o'g'li

Tayanch doktorant (PhD), Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston
Milliy universitetining Jizzax filiali, Jizzax, O'zbekiston

Abdumalikov Akmaljon Abduxoliq o'g'li

Dotsent, Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy
universitetining Jizzax filiali, Jizzax, O'zbekiston

Annotatsiya. Maqolada uch fazali elektr tarmoqlarida kuchlanish nosimmetrikligini monitoring qilish uchun mo'ljallangan ochiq kodli ikki avlodli K2U-Node qurilmasini ishlab chiqish va validatsiya qilish metodikasi bayon etilgan. Kuchlanish nosimmetrikligining teskari ketma-ketlik koeffitsiyentini (K_2U) faqat faza kuchlanishlarining ta'sir etuvchi qiymatlari asosida aniqlashdagi nazariy cheklovlar tahlil qilingan. ESP32 va uchta PZEM-004T v3.0 moduli asosidagi Gen-1 qurilmasi kuchlanish nosimmetrikligini dastlabki skrining va taqsimlangan monitoring qilish uchun taklif etilgan. ATM90E32AS mikrosxemasiga asoslangan Gen-2 qurilmasida esa faza kuchlanishlarining amplitudasi va faza burchaklarini o'lchash orqali simmetrik tashkil etuvchilar hamda K_2U koeffitsiyentini kompleks shaklda hisoblash imkoniyati yaratilgan. Hisoblash misollari faza kuchlanishlari amplitudalari teng bo'lgan holatlarda ham burchak nosimmetrikligi sezilarli K_2U qiymatini yuzaga keltirishi mumkinligini ko'rsatdi. Qurilmani kalibrlash va validatsiya qilishning uch bosqichli metodikasi, shuningdek, GOST 32144-2013 va IEC 61000-4-30 talablariga muvofiq 10 daqiqalik agregatsiya tamoyillari ishlab chiqilgan. Taklif etilgan yechim elektr energiyasi sifatini ko'p nuqtali monitoring qilish, nosimmetriklik manbalarini aniqlash va taqsimlangan energetika obyektlarining texnik holatini baholash uchun istiqbolli hisoblanadi.

Kalit so'zlar: kuchlanish nosimmetrikligi, teskari ketma-ketlik koeffitsiyenti, K_2U , uch fazali elektr tarmog'i, ESP32, PZEM-004T, ATM90E32AS, simmetrik tashkil etuvchilar, elektr energiyasi sifati, ochiq kodli qurilma, monitoring, GOST 32144-2013, IEC 61000-4-30.

Introduction. An ideal three-phase power supply is characterized by three phase voltages of equal magnitude separated by exactly 120°. In practical distribution networks, however, this

condition is rarely maintained because single-phase loads and rooftop photovoltaic inverters are not distributed uniformly among the phases, while network elements may also exhibit asymmetric impedances. The standard quantitative indicator used to characterize voltage unbalance is the negative-sequence voltage unbalance factor, K_2U .

According to Fortescue's method of symmetrical components [1], any unbalanced three-phase voltage system can be uniquely decomposed into positive-sequence, negative-sequence, and zero-sequence components, denoted by U_1 , U_2 , and U_0 , respectively. The negative-sequence voltage unbalance factor is defined as

$$K_{2U} = \frac{|U_2|}{|U_1|} \times 100\% \quad (1)$$

The phase angle of the negative-sequence component can be expressed as

$$\varphi_2 = \arg(U_2), \quad (2)$$

and may provide additional information about the phase primarily associated with the unbalance.

The adverse effects of voltage unbalance on electrical equipment are well established. Since the negative-sequence impedance of rotating electrical machines and power electronic converters is considerably lower than the corresponding positive-sequence impedance, even a 2% voltage unbalance may produce a current unbalance of approximately 15-20% in induction motors. This results in increased electrical losses, additional heating, and accelerated insulation ageing [19]. Different definitions and assessment approaches for voltage unbalance were systematically reviewed by Pillay and Manyage [2]. In grid-connected photovoltaic inverters, negative-sequence voltage components may produce double-frequency ripple in the DC-link and uneven thermal loading of semiconductor devices. At telecommunication facilities, voltage unbalance may also overload individual rectifier modules and motors used in cooling systems.

Two major normative documents define the requirements for correct K_2U measurement. GOST 32144-2013 [6], which is harmonized in scope with EN 50160, establishes two limits at the point of common coupling. The 10-minute aggregated value of K_2U should not exceed 2% during at least 95% of any one-week observation period, while the maximum permissible value of 4% should not be exceeded during 100% of the observation time. The

measurement procedure is specified in GOST 30804.4.30-2013, corresponding to IEC 61000-4-30 [7]. According to these requirements, K_2U is determined from line-to-line voltages, while individual measurement results are aggregated into 10-minute values using quadratic averaging:

$$K_{2U,10min} = \sqrt{\frac{(1)}{(N) \sum_{i=1}^N K_{2U,i}^2}} \quad (3)$$

The aggregation intervals are synchronized with real-time clock boundaries so that measurements obtained from different locations remain directly comparable.

A fundamental measurement-theory limitation is particularly important when designing low-cost monitoring devices. After excluding a common phase reference, a sinusoidal three-phase voltage system has five independent degrees of freedom: three voltage magnitudes and two independent phase angles. A device that measures only the three phase-to-neutral RMS voltage magnitudes therefore observes only three scalar quantities. Consequently, two independent angular degrees of freedom remain unobserved, and K_2U cannot, in general, be uniquely identified from phase-to-neutral RMS magnitudes alone.

This limitation is structural and cannot be eliminated by calibration, filtering, or temporal averaging. For example, two three-phase systems may have identical phase-voltage magnitudes but significantly different phase angles and, consequently, different values of K_2U . The numerical example considered in this study demonstrates that identical voltage magnitudes may correspond to $K_2U=0\%$ in one case and $K_2U=5.17\%$ in another.

This result should not be confused with the finding of Ghijsselen and Van den Bossche [3], who demonstrated that three line-to-line RMS voltage magnitudes are sufficient to determine the positive- and negative-sequence magnitudes U_1 and U_2 without direct phase-angle measurements. Phase-to-neutral voltages provide additional information required primarily for determining the zero-sequence component. The practical differences between line-voltage-based and phase-voltage-based unbalance assessment were also investigated experimentally by Kim et al. [4]. Moreover, IEC 61000-4-30 explicitly notes that magnitude-only phase-voltage approaches do not account for phase-

angle displacement [7].

In real distribution feeders, the resulting estimation error is not purely random but depends on the electrical characteristics of the feeder. If a dominant single-phase load is the main source of voltage unbalance, the corresponding voltage drop is represented by a phasor aligned with the feeder impedance. A magnitude-only measurement detects only the component projected onto the supply-voltage direction. Consequently, the estimated negative-sequence component may approximately recover only the fraction

$$K_{2U,est} \approx K_{2U,true} \cos(\psi - \varphi), \quad (4)$$

Where $\psi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$ is the feeder impedance angle, RR and XX are the feeder resistance and reactance, respectively, and φ is the load displacement angle.

Thus, the degree of underestimation depends directly on the feeder parameters. Hashmi et al. [5], analyzing 161 Spanish low-voltage feeders with R/XR/X ratios ranging from 2.87 to 14.68, found that phase-magnitude-based metrics could provide a reasonable approximation of the actual voltage unbalance in predominantly resistive networks. This agrees with the relationship above because a small impedance angle $(\psi - \varphi)\cos(\psi - \varphi)$ to approach unity. Conversely, near distribution transformers or in networks dominated by reactance and power electronic converters, larger ψ values may cause significant underestimation.

Therefore, magnitude-only measurement should not be considered useless; rather, its validity depends on feeder parameters that the measuring instrument itself does not observe. For this reason, such measurements may be suitable for preliminary screening but cannot alone support a formal statement of compliance with power-quality standards.

This identifiability constraint divides the available measurement solutions into several practical categories and reveals a significant cost gap. Certified IEC 61000-4-30 Class A power-quality analyzers provide standards-compliant measurements with high accuracy, but their cost may reach several thousand US dollars per measurement point. Their proprietary hardware and software also limit their suitability for continuous large-scale deployment, for example, across

hundreds of telecommunication sites or small distributed-generation facilities.

Commercial IoT energy monitors are considerably less expensive and typically provide cloud connectivity, but they are mainly intended for energy metering and generic RMS monitoring and generally do not implement the GOST/IEC procedure for negative-sequence voltage unbalance assessment.

Open-source energy monitoring platforms are more closely related to the present work. The CircuitSetup Expandable 6-Channel ESP32 Energy Meter uses the same ATM90E32AS metering IC selected for the Gen-2 K_2U -Node [8,9]. Similarly, OpenEnergyMonitor has developed mature open-source energy-monitoring hardware over more than a decade [10]. However, both platforms primarily target energy accounting and conventional electrical measurements rather than the direct evaluation of complex symmetrical components.

The closest comparable development is openZmeter. Its three-phase implementation calculates symmetrical components and a voltage-unbalance index and targets IEC 61000-4-30 Class A aggregation together with EN 50160 evaluation [17,18]. The system is based on an embedded Linux platform with a dedicated acquisition front end, and its reported manufacturing cost is below USD 100.

The contribution of the present work is different. K_2U -Node implements a microcontroller-class architecture that directly accesses the voltage-phasor angle registers of a commercially available metering IC, including the required angle-zero calibration procedure. The measured phasors are then used to calculate the symmetrical components in complex form:

$$U_0 = \frac{(1)}{(3)(U_A + U_B + U_C)}, \quad (5)$$

$$U_1 = \frac{(1)}{(3)(U_A + aU_B + a^2U_C)}, \quad (6)$$

$$U_2 = \frac{(1)}{(3)(U_A + a^2U_B + aU_C)}, \quad (7)$$

where

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{(1)}{(2)} + \frac{j(\sqrt{3})}{(2)}. \quad (8)$$

The device subsequently evaluates K_2U according to GOST 32144-2013. At the same time, the study explicitly defines the capabilities and fundamental limitations of the lower-cost magnitude-only monitoring tier. This provides the

theoretical basis for a two-generation K_2U -Node architecture in which a large number of inexpensive screening nodes can be deployed for wide-area monitoring, while phasor-capable nodes are installed at critical measurement points requiring accurate negative-sequence assessment.

Literature Review and Methods. K_2U -Node was developed in two generations, with their respective functions defined by the identifiability limitations discussed above. Gen-1 is designed as a low-cost screening node and combines an ESP32 microcontroller with three PZEM-004T v3.0 modules to measure phase-to-neutral RMS voltage magnitudes. This configuration enables large-scale monitoring of the occurrence and temporal variation of magnitude-based voltage unbalance. However, because phase-angle information is not measured, Gen-1 cannot independently provide the information required for a formal GOST conformity assessment.

Gen-2 is a phasor-capable node based on the ATM90E32AS energy-metering IC. Unlike Gen-1, it acquires both the magnitudes and phase angles of all three phase voltages, enabling the complex symmetrical components and the actual negative-sequence voltage unbalance factor to be calculated. The two-generation concept therefore combines widespread low-cost screening with more comprehensive phasor-based measurements at critical monitoring points.

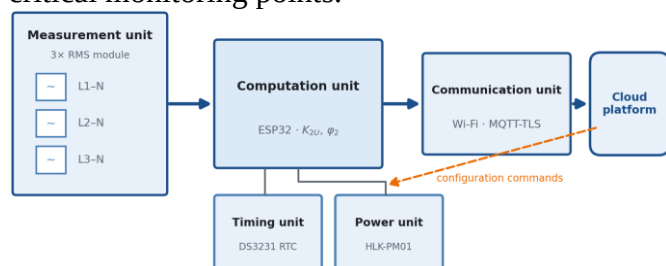


Fig.1. Five-block functional architecture shared by both node generations.

Both generations employ a common five-block functional architecture (Figure 1): (1) a galvanically isolated voltage-measurement block; (2) a processing block based on the ESP32-WROOM-32 dual-core 240 MHz microcontroller with Wi-Fi connectivity and FreeRTOS support [11]; (3) a communication block using MQTT over TLS 1.2 or later, with store-and-forward buffering and security measures based on the NISTIR 8259A

cybersecurity baseline [14]; (4) a time-synchronization block comprising a DS3231 real-time clock (RTC) supported by Network Time Protocol (NTP) synchronization; and (5) an isolated 220 V AC-to-5 V DC power-supply block.

In Gen-1, three PZEM-004T v3.0 modules—factory-calibrated to $\pm 0.5\%$ [12] and used as isolated front ends, an assumption to be confirmed by a dielectric test during the build—are connected to the three phase-to-neutral voltages L1-N, L2-N, and L3-N [12]. The module's 80–260 V input range itself dictates this connection (Figure 2), since a 380 V line-to-line tap is out of range. The modules return RMS voltage over Modbus-RTU/UART, and the ESP32 polls them by UART multiplexing, with the full three-module cycle staying under 200 ms within the 1 s measurement period. An alternative front end—three ZMPT101B transformers connected to a 16-bit ADS1115 ADC—was rejected: 860 SPS across three channels leaves about 5.7 samples per 50 Hz period, which is insufficient for phasor extraction. The PZEM route trades phase information for factory calibration, isolation, and simplicity, and is acceptable only because the node's role is limited to screening. Because the PZEMs report magnitudes only, Gen-1 reconstructs the line voltages under the nominal 120° assumption. The result is a screening estimate, exact when the unbalance is purely of the magnitude type and systematically low whenever angular unbalance is present; the firmware and telemetry schema label the output accordingly.

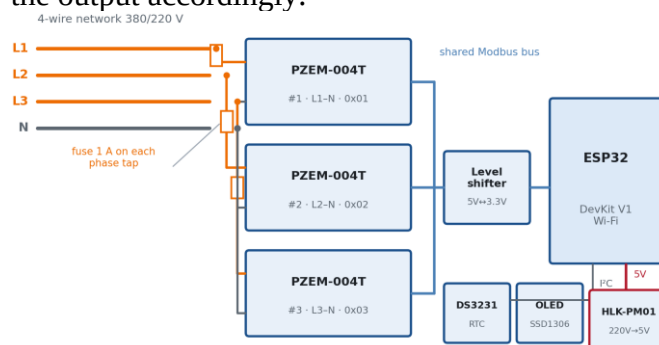


Fig.2. Wiring schematic of the Gen-1 screening node (ESP32 and three PZEM-004T v3.0 modules): RMS magnitudes only; phase angles are not measured.

The line-to-line measurement alternative warrants specific consideration because Ghijselen and Van den Bossche [3] demonstrated that three

line-to-line RMS voltage magnitudes are sufficient to determine K_2U exactly, while GOST 30804.4.30-2013 defines the measurement procedure in terms of line voltages. However, the 380 V line-to-line voltage exceeds the 80–260 V input range of the PZEM-004T v3.0 module. Therefore, a line-to-line implementation would require either a voltage divider or a small potential transformer at the input of each measurement channel. This approach would eliminate one of the main advantages of the PZEM module—its factory calibration—and introduce an additional transformation-ratio uncertainty determined by the external conditioning circuit. For example, a 0.5 % channel-ratio error may introduce an error of approximately 0.17 percentage points in K_2U . In addition, the β -based formulation becomes numerically sensitive near the balanced condition, where the difference between fourth-power voltage terms becomes small. Consequently, a line-to-line screening node is technically feasible, but it was not implemented in the present work and is not claimed as part of the proposed system. Moreover, such a configuration would still not provide the negative-sequence phase angle φ_2 , a separate estimate of the zero-sequence factor K_0U , or full per-second voltage phasors. For these reasons, Gen-2 was designed to measure phase angles directly rather than simply adding additional magnitude-measurement channels.

In Gen-2, the measurement front end is replaced by the Microchip ATM90E32AS three-phase metering IC (Figure 3). The device integrates three per-phase 16-bit sigma-delta ADC channels, supports an SPI host interface, and is specified for energy-metering applications with accuracy up to $\pm 0.5\%$ [13]. The commercially available board used in the CircuitSetup energy meter [8] provides a suitable hardware carrier for this implementation. Two implementation details were found to be particularly important. First, the ATM90E32AS provides two different groups of angle registers. The PAngle registers, located at addresses 0xF9–0xFB, represent the angle between the voltage and current of each phase, whereas the Uangle registers, located at 0xFD–0xFF, represent the phase angle of each voltage phasor relative to the internal reference. Since the symmetrical-component calculation requires voltage-phasor angles, the Uangle registers must be used.

The commonly used open-source CircuitSetup ATM90E32 library [9] and the ESPHome atm90e32 component define these register addresses, but their standard phase-angle outputs are associated with PAngle rather than Uangle. They also do not provide a dedicated high-level interface for using the voltage-phasor angles in symmetrical-component calculations. The Gen-2 firmware therefore reads the Uangle registers directly through the generic register-access interface and passes the resulting values to the symmetrical-components calculation module.

A second important issue is phase-angle calibration. According to the datasheet, the fiducial-error specification corresponds to an angular uncertainty that may reach approximately $\pm 0.9^\circ$ over a 180° scale, although the documentation does not explicitly state whether this limit applies directly to the Uangle registers. Because even a small angular error may noticeably affect the calculated voltage-unbalance factor, phase-angle offset calibration is required. During calibration, the three voltage inputs are supplied in parallel from the same transformer secondary so that the true inter-channel phase difference is nominally zero. The offsets of channels B and C relative to channel A are then recorded over a 60 s interval, averaged, stored in non-volatile memory, and subsequently subtracted from the measured phase angles during operation.

After calibration, the firmware reconstructs the three phase-voltage phasors as

$$\underline{U}_A = U_A e^{j\theta_A}, \quad (9)$$

$$\underline{U}_B = U_B e^{j\theta_B}, \quad (10)$$

$$\underline{U}_C = U_C e^{j\theta_C}. \quad (11)$$

The corresponding line-to-line phasors are obtained by complex subtraction:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B, \quad (12)$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C, \quad (13)$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \quad (14)$$

The positive-, negative-, and zero-sequence components are then calculated using the rotation operator $a = e^{j120^\circ}$, as

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C), \quad (15)$$

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C), \quad (16)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C). \quad (17)$$

The voltage-unbalance factors are

subsequently determined as $K_{2U} = \frac{|U_2|}{|U_1|} \times 100\%$ and $K_{0U} = \frac{|U_0|}{|U_1|} \times 100\%$.

The negative-sequence phase angle is evaluated as $\varphi_2 = \arg(U_2)$.

If the magnitude of U_2 is too small for the phase angle to be physically meaningful, the firmware returns NaN rather than reporting an artificial value of zero.

Gen-2 is intended for autonomous monitoring campaigns lasting up to 30 days. Measurement data are stored locally on a microSD card, with files rotated daily to simplify long-term data management and recovery. Wi-Fi and MQTT communication are used mainly for status reporting, remote configuration, and supervisory access rather than as the primary data-storage path. This design choice improves robustness in rural and weak-coverage distribution networks, where continuous wireless connectivity cannot be assumed.

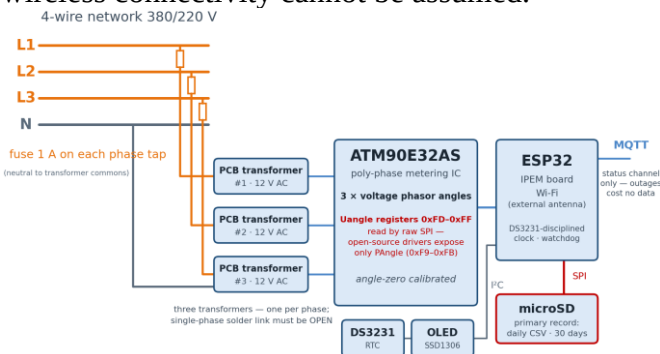


Fig.3. Wiring schematic of the Gen-2 phasor node (ATM90E32AS metering circuit, one voltage transformer per phase): all three voltage-phasor angles are measured, so true K_{2U} , K_{0U} and the negative-sequence angle are reported.

Both generations run the same four-stage processing pipeline (Figure 4), differing only in what enters Stage 3. Stage 1, acquisition at s: Gen-1 polls the PZEMs, while Gen-2 reads the ATM90E32AS magnitude and Uangle registers. Stage 2, filtering and plausibility control: frames with CRC errors are discarded, while readings outside the front end's 80–260 V window are retained and flagged rather than dropped, after the manner of IEC 61000-4-30, so that deep sags and phase loss—the states of highest unbalance, and those exercised by the test suite—are not silently

deleted from the record; each aggregate carries its valid-sample count. A 5-point sliding median filter suppresses short transients on the display and alerting path only, and is bypassed on the aggregation path, since pre-filtering the basic measurements would bias the quantity on which conformity is judged. Stage 3, K_{2U} computation: Gen-2 computes the complex symmetrical components as above, while Gen-1 applies the IEC 61000-4-30 magnitude method to the reconstructed line voltages via and, in double precision with β clamped to $[1/3, 1/2]$; the β formula is exact for true line-to-line RMS values [3], but on Gen-1's reconstructed values it is a screening estimate. Stage 4, standard aggregation: 1 s values are combined into 10-minute windows by quadratic averaging per GOST 30804.4.30-2013, with windows anchored to the RTC at minutes :00, :10 and so on; each window records mean, minimum, maximum, dwell time above the 2% and 4% limits, and its valid-sample count, while the weekly 95th-percentile evaluation runs server-side. The firmware is organised as five FreeRTOS tasks and fits within the flash and RAM of a standard ESP32-WROOM-32; the node runs from a single isolated 5 V supply.

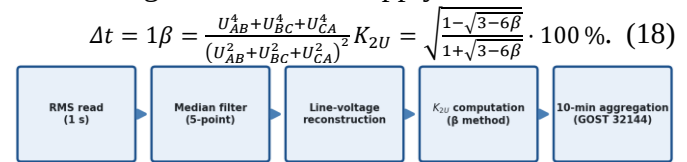


Fig.4. Four-stage processing pipeline: acquisition, filtering, K_{2U} computation and aggregation. In Gen-1, the line-voltage reconstruction assumes 120-degree spacing, which makes its K_{2U} a screening estimate.

Physically, the node is assembled in an IP65 DIN-rail enclosure (about $200 \times 150 \times 80$ mm) for installation in or beside a distribution panel, with protection and supply on the upper rail, the measurement modules and ESP32 on the middle rail, and the OLED status display on the door (Figure 5). The bill of materials comprises components common to both generations (ESP32 DevKit, HLK-PM01 supply, DS3231 RTC, SSD1306 OLED, level shifter, enclosure, MCB, fuses, glands and terminal blocks), the three PZEM-004T v3.0 modules for Gen-1, and, for Gen-2, the ATM90E32AS metering board, three 230:12 V AC

voltage transformers—one per phase, providing galvanic isolation of the voltage inputs—and the microSD subsystem. A resistive divider must not be substituted, since it would place the logic side at mains potential. A Gen-1 node totals about 74 USD at indicative single-unit prices, while a Gen-2 node is dominated by the metering board and the transformers and is correspondingly more expensive; final figures will be reported from purchase invoices. All design files—schematics, enclosure layout, both PlatformIO firmware projects, the hardware-independent symmetrical-components C module with its host test bench, and the JSON telemetry schema—are released under the MIT license at github.com/sherbaev/unbalance and github.com/sherbaev/k2u.

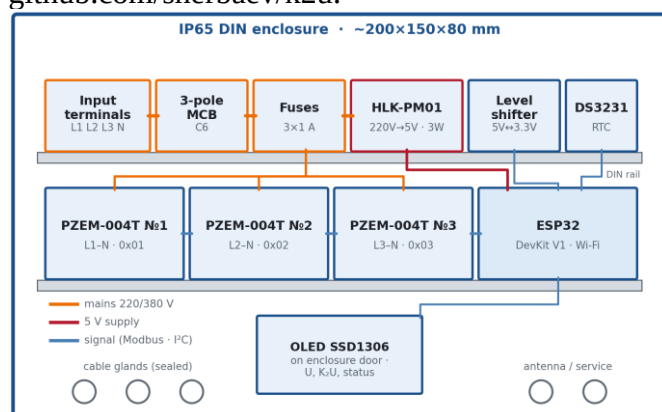


Figure 5. Component layout in the IP₆₅ DIN-rail enclosure (drawing, not to scale).

This division corresponds to the instrument classes defined by the measurement standard itself. IEC 61000-4-30 distinguishes Class A, for results that must be reproducible and contractually binding, from Class S, intended for statistical surveys over many points with a reduced parameter set and relaxed uncertainty. Gen-1 falls below Class S: it does not measure the quantity defined by the standard and is reported as an exposure indicator. Gen-2 implements the Class S computation and aggregation chain; whether it meets the Class S uncertainty requirement is what the pending characterisation must establish, and no class conformity is claimed in advance of that determination.

The system-level validation methodology has three stages, with acceptance limits fixed with the reference laboratory before the campaign; the quantitative results will be reported upon its

completion. Stage 1 compares each channel against a certified reference voltmeter at five points spanning 80–260 V, fits linear corrections (k , b) for each channel into the firmware, and records the residual error. Stage 2 produces bench unbalance states at $K_2U = 0.5, 1, 2, 3$, and 4% and records the deviation $|\Delta K_2U|$ against an IEC 61000-4-30 Class A analyzer at every set point. Stage 3 runs the node for seven days beside that analyzer on a live network and compares the paired 10-minute aggregates using the Bland–Altman method—bias and 95 % limits of agreement—rather than correlation, which measures association, not agreement, with both instruments’ windows aligned to the same clock boundaries. A methodological caveat governs Stage 2: an autotransformer bench produces only magnitude unbalance, exactly the class in which the magnitude-based method is already correct; therefore, passing this test proves nothing about angle blindness. Gen-2 must therefore also be exercised with a three-phase programmable source generating angular cases (for example, $120^\circ \pm 2^\circ$ at equal magnitudes), in which Gen-1 reads near zero by construction. Because the ATM90E32AS derives its angles from zero crossings—making them sensitive to distortion in a way that an RMS magnitude is not—the protocol also injects differential harmonics at levels permitted by GOST 32144-2013 (fifth harmonic up to 6 %, unequally distributed) and records the resulting K_2U deviation.

Results. A worked example makes the identifiability limit concrete and quantifies why the two-generation split is necessary. Set all three phase magnitudes to 220.0 V, with angles $0^\circ/-110^\circ/+125^\circ$: the complex symmetrical components yield the true $K_2U = 5.17\%$, which exceeds even the 4 % maximum limit, whereas any method based on the three phase-to-neutral RMS magnitudes returns 0.000 %, since the magnitudes are identical. A second case lies exactly at the normative boundary: 230 V on all phases at $0^\circ/-118^\circ/+118^\circ$ yields a true $K_2U \approx 2.0\%$, yet reads 0 %. To first order, a 1° angular deviation in one phase corresponds to approximately 0.58 percentage points of K_2U —a large value relative to a 2% limit.

A Monte Carlo propagation of distributions following GUM Supplement 1 [16] (200,000 random unbalanced states) separates the two error

contributions in the Gen-1 chain. Channel gain errors are drawn independently from a normal distribution whose $\pm 0.5\%$ class limit is taken as 2σ ; states are drawn uniformly over magnitude unbalance with nominal angles. Under these assumptions, the estimate is practically unbiased away from zero: the mean deviation is $+0.004$ pp, with a 95 % coverage interval of ± 0.20 pp. Near a balanced state, however, the non-negativity of K_2U produces a small positive offset. Reading the class limit instead as a rectangular distribution, the GUM default for a manufacturer's accuracy class, widens the interval to approximately ± 0.23 pp; the script and its seed are published with the firmware. Adding angular deviations of up to $\pm 2^\circ$ produces systematic underestimation. On a real feeder, this deficit is deterministic, not noise: with a dominant single-phase load, the magnitude method recovers only the fraction $\cos(\psi - \varphi)$ of the true K_2U —an acknowledged systematic effect in the sense of GUM clause 3.2.3 that must be corrected here by the Gen-2 phasor measurement, not absorbed into an uncertainty budget. This behavior is consistent with the underestimation of magnitude-based metrics reported for LV networks by Hashmi et al. [5].

The symmetrical-components module is hardware-independent and was checked on the host against a complex-arithmetic reference over seven cases: pure magnitude unbalance, pure angular unbalance, combined cases, and complete phase loss. Two arithmetic paths must be distinguished. The double-precision implementation of the shared K_2U core reproduces the reference to [value not provided], whereas the node-side C module computes in single precision to match the ESP32 floating-point unit and agrees with the same reference to within [value not provided] percentage points of K_2U over those cases. Both are round-off effects, six orders of magnitude below the 2% limit; therefore, the implementation introduces no error of practical significance. This constitutes a numerical verification of the computation chain, not a metrological validation, and no statement about measurement accuracy follows from it. The test bench is included in the repository and runs in CI. Six functional scenarios verify system behavior against stated criteria: normal operation (telemetry freshness ≤ 30 s), unbalance $\geq 2\%$ and $\geq 4\%$ (advisory within 15 s), a 30-minute Wi-Fi outage

(aggregate loss $\leq 0.1\%$ via store-and-forward), broker failure (recovery ≤ 2 min), and power interruption (restart with time resynchronization ≤ 60 s). These advisories act on instantaneous values and are deliberately distinct from a GOST assessment, whose normative test is the weekly 95th percentile of 10-minute values. $2.3 \cdot 10^{-13} 2.9 \cdot 10^{-6}$

Discussion. Several limitations bound the present results. First, Gen-1 is not compliance-capable by design: its outputs are labelled as screening data, and no conformity statement under GOST 32144-2013 may be based on them. Second, the key validation values are pending: the voltage residual error, the K_2U deviation against the Class A analyzer, and the 7-day agreement will be reported when the laboratory and field campaigns are complete, with the calibration protocols published alongside. Third, the work is at the single-prototype stage: one unit of each generation has been built and operated on a bench, while unit-to-unit spread, long-term drift, and the temperature behavior of the ATM90E32AS angle channels remain to be characterized on a small batch. Fourth, the cost comparison rests on component list prices, will be finalized from purchase invoices, and covers hardware only. Fifth, the angle accuracy bound is inferred from a fiducial-error specification whose applicability to the U_{angle} registers is not stated; angle-zero calibration mitigates offset but not gain, harmonic, or temperature effects, which the programmable-source tests must bound.

A further limitation is legal rather than technical. Where GOST 32144-2013 applies, an instrument used for a conformity assessment must hold type approval and undergo periodic verification. K_2U -Node has neither; therefore, its readings—however accurate the pending characterization shows them to be—support engineering diagnosis, exposure mapping, and maintenance decisions, but not a formal determination of compliance. This is the intended role: in Uzbekistan, as in comparable networks with rapidly growing single-phase rooftop generation, the certified analyzers available to a utility number in the dozens, whereas the sites that would benefit from continuous monitoring number in the thousands. It is this coverage gap that an open device can close.

A safety note applies to any reproduction of this work. The device connects to a live 380/220 V three-phase network; all mains-side wiring must be performed by a qualified, authorized electrician on de-energized, locked-out equipment, with the absence of voltage verified on every conductor before it is touched, in compliance with local electrical safety regulations. The design provides galvanic isolation between the mains and the logic/user side (an isolated PZEM-004T front end in Gen-1, one voltage transformer per phase in Gen-2, and an HLK-PM01 isolated supply), and the voltage taps must be rated for the installation category of a distribution panel (CAT III/IV). No USB connection may be made to the node while the taps are live. Fused voltage taps, an upstream three-pole MCB, and an IP₆₅ enclosure do not substitute for safe working procedures: the enclosure interior contains lethal voltages whenever the taps are connected, and firmware should be developed and debugged on a low-voltage bench before any live connection.

Conclusion. K2U-Node shows how standards-referenced monitoring of the negative-sequence voltage unbalance factor—the line-voltage computation, RTC-aligned 10-minute quadratic aggregation, and two-level 2%/4% evaluation specified by GOST 32144-2013 and IEC 61000-4-30—can be implemented on open, commodity hardware. A Gen-1 screening node costs about 74 USD in single units, compared with several

thousand USD for a certified Class A analyser; the Gen-2 node, which computes the standard quantity, is being costed from purchase invoices. The comparison covers hardware only, and a certified analyser additionally carries an approval that an open device does not claim. The two-generation architecture turns a measurement-theory limitation into a deployment strategy and mirrors the Class S/Class A tiering of the standard itself: Gen-1 is confined to wide-area screening and exposure mapping, whereas the Gen-2 phasor node—reading the Uangle registers that no published driver exposes as a sensor, applying mandatory angle-zero calibration, and logging to an SD card as the primary record for 30-day campaigns—delivers K_2U , K_0U , and φ_2 at the decisive points. Its single-precision embedded implementation agrees with a double-precision complex-arithmetic reference to within [value] percentage points of K_2U , providing numerical verification rather than metrological verification, and the three-stage methodology—including the angular and harmonic cases that a magnitude-only bench cannot produce—defines the path to metrological characterisation. All designs, firmware, and test benches are openly licensed, so the device can be reproduced, audited, and extended $3 \cdot 10^{-6}$.

REFERENCES

- [1] Fortescue, C. L. (1918). Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 37(2), 1027–1140. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1918.4765570>
- [2] Pillay, P., & Manyage, M. (2001). Definitions of voltage unbalance. IEEE Power Engineering Review, 21(5), 50–51. <https://doi.org/10.1109/39.920965>
- [3] Ghijselen, J. A. L., & Van den Bossche, A. P. M. (2005). Exact voltage unbalance assessment without phase measurements. IEEE Transactions on Power Systems, 20(1), 519–520. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.841146>
- [4] Kim, J.-G., Lee, E.-W., Lee, D.-J., & Lee, J.-H. (2005). Comparison of voltage unbalance factor by line and phase voltage. In Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2005) (Vol. 3, pp. 1998–2001). <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2005.202912>
- [5] Hashmi, M. U., Koirala, A., Lundholm, R., Ergun, H., & Van Hertem, D. (2022). Evaluation of voltage magnitude based unbalance metric for low voltage distribution networks. In 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). <https://doi.org/10.5281/zenodo.6171009>

- [6] GOST 32144-2013. (2013). Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems.
- [7] GOST 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2015). (2013). Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality measurement methods.
- [8] CircuitSetup. (n.d.). Expandable 6-channel ESP32 energy meter [Hardware and software documentation]. GitHub.
- [9] CircuitSetup. (n.d.). ATM90E32 Arduino library [Software library]. GitHub.
- [10] OpenEnergyMonitor. (n.d.). Open-source energy monitoring hardware: emonTx and emonPi. GitHub.
- [11] Espressif Systems. (2023). ESP32-WROOM-32 datasheet.
- [12] Peacefair. (2019). PZEM-004T V3.0 user manual: AC communication module.
- [13] Microchip Technology Inc. (n.d.). ATM90E32AS enhanced poly-phase high-performance wide-span energy metering IC datasheet (DS-46003).
- [14] National Institute of Standards and Technology. (2020). IoT device cybersecurity capability core baseline (NISTIR 8259A). <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8259A>
- [15] Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (JCGM 100:2008).
- [16] Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). Evaluation of measurement data—Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement—Propagation of distributions using a Monte Carlo method (JCGM 101:2008).
- [17] Viciano, E., Alcayde, A., Montoya, F. G., et al. (2023). All-in-one three-phase smart meter and power quality analyzer with extended IoT capabilities. *Measurement*, 206, 112309. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112309>
- [18] Viciano, E., Alcayde, A., Montoya, F. G., et al. (2018). OpenZmeter: An efficient low-cost energy smart meter and power quality analyzer. *Sustainability*, 10(11), 4038. <https://doi.org/10.3390/su10114038>
- [19] von Jouanne, A., & Banerjee, B. (2001). Assessment of voltage unbalance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16(4), 782–790. <https://doi.org/10.1109/61.956770>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Sherbaev, J., & Abdumalikov, A. (2026). K₂U-NODE: Design and validation methodology of an open-source two-generation device for three-phase voltage-unbalance monitoring. *Digital Technologies in Industry*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.29>

UO‘K: 614.841.332

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.30

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

YER OSTI KON LAHIMLARINI ANKERLI MUSTAHKAMLASHDA MINERAL KOMPOZITSIYALI IKKI KOMPONENTLI AMPULALARNING SAMARADORLIGINI BAHOLASH



**Mislibayev Ilxom
Tuychibayevich**

Navoiy davlat konchilik va
texnologiyalar universiteti,
Konchilik ishi kafedrası professori,
t.f.d., Navoiy, O'zbekiston
E-mail: mislibayev65@mail.ru
ORCID ID: 0009-0004-6530-6729
Science ID: DSN-0226-0012



**Bo'riyev Feruz Mansur
o'g'li**

"NKMK" AJ Janubiy kon
boshqarmasi O'quv-kurs kombinati
ishlab chiqarish ta'limi katta usti,
Navoiy viloyati, O'zbekiston
E-mail: boriyevferuz2@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-7569-3688
Science ID: MJZ-0426-0031



**Nizomov To'lg'in
Najimovich**

"NKMK" AJ Janubiy kon
boshqarmasi bosh muhandisi,
Navoiy viloyati, O'zbekiston
E-mail:
tolqinnizimov955@gmail.com
ORCID ID: 0009-0000-3017-2151
Science ID: BNV-0826-0007



**Nurxonov Xusan Almirza
o'g'li**

Qarshi davlat texnika universiteti,
Geologiya va konchilik ishi
kafedrası dotsenti, t.f.f.d., Qarshi,
O'zbekiston
E-mail: nurxonovxusan@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-4526-7211
Science ID: FQD-0225-0030

Annotatsiya. Maqolada yer osti kon lahimlarini ankerli mustahkamlashda mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalardan foydalanish samaradorligi tahlil qilingan. Turli kon-geologik sharoitlarda ankerlarning mahkamlanish xususiyatlari, ampula zichligining mahkamlash mustahkamligiga ta'siri hamda mineral kompozitsiyali va polimer ampulalarning asosiy texnik-ekspluatatsion ko'rsatkichlari qiyosiy baholangan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, ampula zichligi $600\text{--}2000\text{ kg/m}^3$ oralig'ida oshirilganda mahkamlash mustahkamligi 8,2 MPa dan 36,8 MPa gacha ortishi aniqlangan. Mineral kompozitsiyali ampulalarning yuqori termik barqarorligi, yonmasligi, nam shpurlarda ishlash imkoniyati va uzoq muddat davomida mahkamlash xususiyatlarini saqlashi ularning polimer ampulalarga nisbatan muhim afzalliklari sifatida asoslangan. Shuningdek, 27–30 mm diametrli shpurlardan foydalanish va ankerlarni 8–10 soniya davomida o'rnatish imkoniyati mustahkamlash jarayonining texnologik samaradorligini oshirishi ko'rsatilgan. Olingan natijalar mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalarni murakkab kon-geologik sharoitlarda yer osti kon lahimlarini barqarorlashtirishning istiqbolli vositasi sifatida qo'llash mumkinligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: yer osti kon lahimlari, ankerli mustahkamlash, mineral kompozitsiya, ikki komponentli ampula, anker, mahkamlash mustahkamligi, ampula zichligi, nam shpur, termik barqarorlik, polimer ampula.

Received: 15.08.2026

Accepted: 13.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ АМПУЛ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ ПРИ АНКЕРНОМ КРЕПЛЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

**Мислибаев Илхом
Туйчибаевич**

Профессор кафедры «Горное
дело» Навоийского
государственного горно-
технологического университета,
доктор технических наук, Навои,
Узбекистан

**Бურიев Феруз Мансур
угли**

Старший мастер
производственного обучения
Учебно-курсового комбината
Южного рудоуправления АО
«НГМК», Навоийская область,
Узбекистан

**Низомов Тулкин
Нажимович**

Главный инженер Южного
рудоуправления АО «НГМК»,
Навоийская область, Узбекистан

**Нурхонов Хусан
Алмирза угли**

Доцент кафедры геологии и
горного дела Каршинского
государственного технического
университета, PhD по
техническим наукам, Карши,
Узбекистан

Аннотация. В статье проведён анализ эффективности применения двухкомпонентных ампул на основе минеральной композиции при анкерном креплении подземных горных выработок. Выполнена сравнительная оценка характеристик закрепления анкеров в различных горно-геологических условиях, влияния плотности ампул на прочность закрепления, а также основных технических и эксплуатационных показателей минерально-композиционных и полимерных ампул. Установлено, что при увеличении плотности ампулы в диапазоне 600–2000 кг/м³ прочность закрепления возрастает с 8,2 до 36,8 МПа. Высокая термическая устойчивость, негорючесть, возможность применения во влажных шпурах и сохранение характеристик закрепления в течение длительного периода определены как основные преимущества минерально-композиционных ампул по сравнению с полимерными аналогами. Показано, что применение шпуров диаметром 27–30 мм и возможность установки анкера в течение 8–10 секунд повышают технологическую эффективность крепёжных работ. Полученные результаты подтверждают перспективность применения двухкомпонентных минерально-композиционных ампул для обеспечения устойчивости подземных горных выработок в сложных горно-геологических условиях.

Ключевые слова: подземные горные выработки, анкерное крепление, минеральная композиция, двухкомпонентная ампула, анкер, прочность закрепления, плотность ампулы, влажный шпур, термическая устойчивость, полимерная ампула.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF TWO-COMPONENT MINERAL-COMPOSITE CAPSULES FOR ROCK BOLTING IN UNDERGROUND MINE WORKINGS

**Mislibayev Ilkhom
Tuychibayevich**

Professor, Department of Mining
Engineering, Navoi State University
of Mining and Technologies, Doctor
of Technical Sciences, Navoi,
Uzbekistan

**Boriyev Feruz Mansur
ugli**

Senior Industrial Training
Instructor, Training and Course
Center, Southern Mining
Administration, JSC “NMMC”,
Navoi Region, Uzbekistan

**Nizomov Tolqin
Najimovich**

Chief Engineer, Southern Mining
Administration, JSC “NMMC”,
Navoi Region, Uzbekistan

**Nurkhonov Khusan
Almirza ugli**

Associate Professor, Department of
Geology and Mining, Karshi State
Technical University, PhD in
Technical Sciences, Karshi,
Uzbekistan

Abstract. This study evaluates the effectiveness of two-component mineral-composite capsules used for rock bolting in underground mine workings. The anchorage performance under various mining and geological conditions, the effect of capsule density on anchorage strength, and the principal technical and operational characteristics of mineral-composite and polymer capsules are comparatively assessed. The results indicate that increasing the capsule density from 600 to 2000 kg/m³ increases the anchorage strength from 8.2 to 36.8 MPa. High thermal stability, non-combustibility, applicability in wet boreholes, and long-term retention of anchorage properties are identified as major advantages of mineral-composite capsules over polymer alternatives. The use of 27–30 mm diameter boreholes and the ability to install anchors within 8–10 s are also shown to improve the technological efficiency of the support process. The obtained results demonstrate that two-component mineral-composite capsules are a promising solution for improving the stability and reliability of underground mine workings under complex mining and geological conditions.

Keywords: underground mine workings, rock bolting, mineral composite, two-component capsule, anchor bolt, anchorage strength, capsule density, wet borehole, thermal stability, polymer capsule.

Kirish. Yer osti kon lahimlarini burg'ilash va portlatish ishlari orqali o'tish jarayonida tog' jinslari turg'unligi o'zgaradi. Natijada kon lahimi konturi atrofida kuchlanish-deformatsiyalarning qayta taqsimlanishi, tog' jinslarining buzilishi, yoriqlarning o'zgarishi va qulash xavfi yuzaga keladi. Shu sababli kon lahimlarining barqarorligini ta'minlash uchun samarali mustahkamlash tizimlaridan foydalanish talab etiladi. Hozirgi kunda ankerli mustahkamlash ishlari yer osti kon lahimlarini mustahkamlashning samarali usullaridan biri hisoblanadi. Ankerning yuk ko'tarish qobiliyati ko'p jihatdan uning shpur devori bilan bog'lanish mustahkamligi va anker sterjeni atrofidagi mahkamlovchi materialning xususiyatlariga bog'liq. Mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalar (AMK DK) ankerlarni tez va ishonchli o'rnatish imkonini beruvchi texnologik vosita sifatida muhim ahamiyatga ega. Mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalar yetti yildan buyon ankerlarni mustahkamlash uchun Rossiyaning ko'mir shaxtalari va rudniklarida keng qo'llanib kelinmoqda. Jumladan, "Baykamskaya" shaxtasida 20 km dan ortiq lahimlar mustahkamlangan, shuningdek, «Vladimirskeya» shaxtasi, "Xolbinskiy", "Irokinda", "Xujir" va boshqa rudniklarda qo'llanilgan [1].

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Yer osti kon lahimlarini mustahkamlashda qo'llaniladigan mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalarning ankerli mustahkamlash tizimidagi samaradorligini baholash ularning mahkamlash mustahkamligi, yuk ko'tarish qobiliyati, nam sharoitda ishlash xususiyati va siklik yuklamalarga chidamliligini aniqlashdan iborat. "Ko'mir shaxtalarida ankerli mustahkamlashni hisoblash va qo'llash bo'yicha yo'riqnoma"ga muvofiq, sterjenli-mineralli ankerli mustahkamlash quyidagi yer osti kon lahimlarida qo'llanishi tavsiya etiladi: xizmat muddati 10 yildan ortiq bo'lgan; o'z-o'zidan qulashga moyil qatlamlar bo'ylab o'tilgan; obval (qulash) hodisalari bilan bog'liq bo'lgan tog'-kon lahimlarida.

Hozirgi vaqtda ampulalar konning turli sharoitlarida ham samarali qo'llanilmoqda. Shunga qaramay, sterjenli-mineralli ankerli mustahkam-

lashni o'rnatish tezligini oshirish va qisqa vaqt ichida ankerning mahkamlash mustahkamligini ta'minlash maqsadida yangi mineral kompozitsiyali pozitsion ikki kamerali ampula ishlab chiqilgan [4–5].

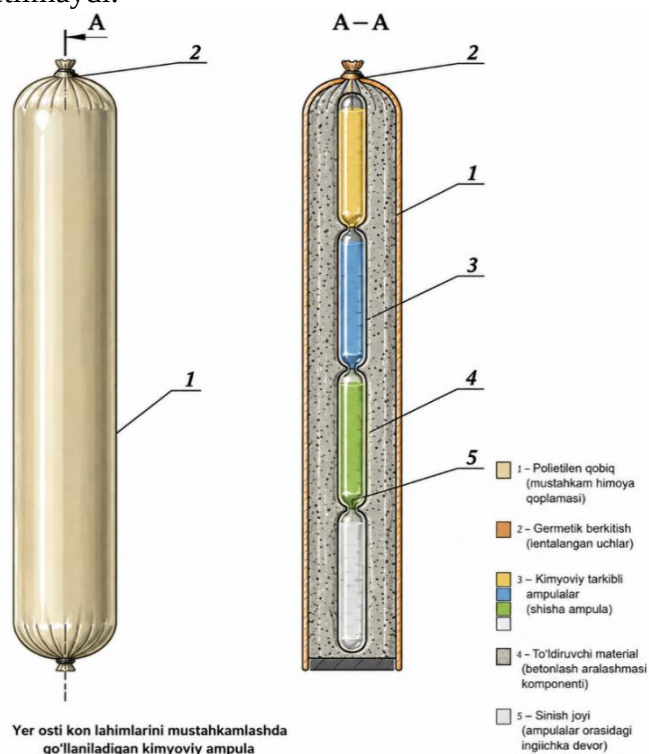
Mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalardan foydalanish quyidagi afzalliklarga ega:

kichik diametrli (27–30 mm) shpur burg'ilanadi;

shpurning tubigacha kerakli miqdordagi ampulalar joylashtiriladi;

bir tekis aylanma rejimiga ega stanok yordamida 8–10 soniya davomida o'rnatiladi;

ampula tarkibining qotishini kutish talab etilmaydi.



Yer osti kon lahimlarini mustahkamlashda qo'llaniladigan kimyoviy ampula

1-rasm. Mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulaning umumiy ko'rinishi.

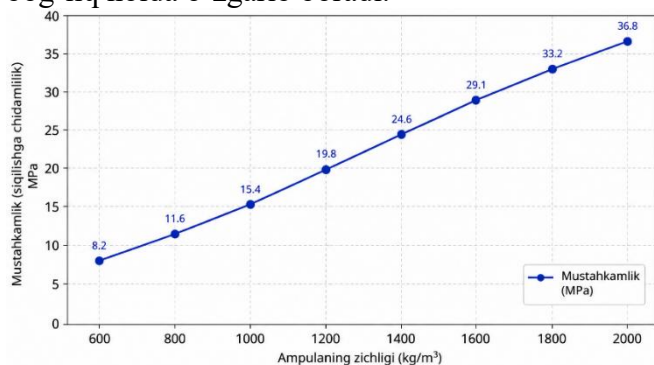
Kompozitsiya o'rnatish jarayonida qotirgich bilan bir tekis aralashtirilishi tufayli mineral kompozitsiyaning gidratatsiyasi mahkamlovchi vtulkaning butun hajmi bo'ylab amalga oshadi. Shundan so'ng gaykani tortish orqali ankerga dastlabki taranglik (oldindan zo'riqish) beriladi.

Mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalarning asosiy afzalliklaridan biri shundaki, o'z-o'zidan yonish yoki shaxtada yong'in sodir bo'lgan taqdirda ham, mahkamlovchi vtulkaning mineral tarkibi yonmaydiganligi hisobiga ankerli mustahkamlashning yuk ko'tarish qobiliyati saqlanib qoladi.

Bu xususiyat uni ko'mir qatlamlarini qayta ishlash hamda o'z-o'zidan yonishga moyil bo'lgan qatlamlarni qazib olish sharoitlarida qo'llashni xavfsiz qiladi.

Ishlab chiqilgan aralashma tarkibining termik barqarorligi, mustahkamligi pasaymagan holda, kamida 600 °C ni tashkil etadi. Bu ko'rsatkich polimer ampulalarga nisbatan 4 martadan ortiq yuqori: polimer ampulalarda erish harorati 165 °C, alanganish harorati esa 300 °C ni tashkil etadi. Mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalardan hosil bo'lgan mahkamlovchi vtulkaning reologik xususiyatlari vaqt o'tishi bilan, polimer tarkibli ampulalardan farqli ravishda, o'zgarmaydi. Polimer tarkibli ampulalarda esa mahkamlovchi vtulkaning mustahkamligi shaxta sharoitida foydalanishning ikkinchi yilidayoq pasaya boshlaydi, bu esa tarkibning cho'kishi hisobiga yuzaga keladi [5].

Yer osti kon lahimlarida kimyoviy ampulaning zichligi tog' jinsining siqilishiga bog'liq holda o'zgarib boradi.



2-rasm. Mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampula zichligining anker mahkamlash mustahkamligiga ta'siri.

Yer osti kon lahimlarini mustahkamlashda ampula zichligiga bog'liqlik grafigini ko'rishimiz mumkin.

Mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalarning polimer ampulalarga nisbatan asosiy texnik afzalliklari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Mineral kompozitsiyali ikki komponentli va polimer ampulalarning texnik-ekspluatatsion xususiyatlarini qiyosiy baholash

Ko'rsatkichlar	Mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampula	Polimer ampula
Zaharli bug'larning ajralib chiqishi	Ajralib chiqmaydi	Ajralib chiqadi
Ankerlarning ishonchli mahkamlanishi	Mustahkam	Mustahkam
Mahkamlovchi materialning yonmasligi va yonishni qo'llab-quvvatlamasligi	Mavjud	Mavjud emas
Mahkamlangandan 30 daqiqa o'tgach ankerning hisobiy yuk ko'tarish qobiliyatini ta'minlashi	Mavjud	Mavjud
Uzoq muddat xizmat qiladigan (5 yil va undan ortiq) tog'-kon lahimlarida ankerli mahkamlashning ishga yaroqliligi	Mavjud	Mahkamlash qobiliyatini davriy nazorat qilish talab etiladi
Shpurga ampula tarkibini aralashtirish operatsiyasi	Mavjud emas	Majburiy
Ampulani saqlash muddati	12 oy	6 oygacha
Ampulani saqlash harorati	-50 °C dan +50 °C gacha	+4 °C dan +20 °C gacha
Nam (suvli) jinslarda ishlash qobiliyati	Mavjud	Mavjud emas

Ankerli mahkamlash ishlaridan so'ng mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalarni suvda oldindan ivitish zaruratisiz shpurlarga joylashtirish imkonini beradi. Mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalardan foydalanish samaradorligi, ya'ni namlangan shpurlarda kon lahimlarini mustahkamlash imkoniyati quyidagilarda namoyon bo'ladi:

- namlangan sharoitlarda mahkamlash samaradorligi;
- kon lahimlarini o'tishda mahkamlashdan foydalanish qulayligi;
- osma monorels yo'llari uchun ankerlardan foydalanish imkoniyati, shuningdek, siklik yuklamalar ta'sirida mahkamlash mustahkamligining ishonchiligi.

Natijalar: Olib borilgan tahlil natijalari mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalardan foydalanish yer osti kon lahimlarini ankerli mustahkamlashda texnologik va ekspluatatsion jihatdan samarali ekanligini ko'rsatdi. Ampula tarkibidagi komponentlar o'rnatish jarayonida mahkamlovchi element bilan aralashtiriladi va mineral kompozitsiyaning gidratatsiyasi natijasida mahkamlovchi vtulkaning butun hajmi bo'ylab qotish jarayoni sodir bo'ladi. Bu ankerga dastlabki taranglik berish hamda uni tog' jinsi massivida

ishonchli mahkamlash imkonini beradi.

Mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalarning muhim texnologik afzalligi shundaki, ular uchun kichik diametrli (27–30 mm) shpurlar burg‘ilanishi mumkin, shurning tubigacha kerakli miqdordagi ampulalar joylashtiriladi va o‘rnatish jarayoni bir tekis aylanish rejimida 8–10 soniya davomida bajariladi. Ampula tarkibining qotishini alohida kutish talab etilmasligi ankerli mustahkamlash ishlarining tezkorligini oshiradi.

Ampula zichligining mahkamlash mustahkamligiga ta’siri bo‘yicha keltirilgan grafik ma’lumotlar zichlik ortishi bilan mahkamlash mustahkamligi muntazam ravishda oshishini ko‘rsatadi. Ampula zichligi 600 kg/m³ dan 2000 kg/m³ gacha oshirilganda, mahkamlash mustahkamligi taxminan 8,2 MPa dan 36,8 MPa gacha ortgan. Bu natija mineral kompozitsiya zichligini ankerli mahkamlanish qobiliyatini belgilovchi muhim texnologik ko‘rsatkichlardan biri sifatida baholash imkonini beradi.

Taqqoslash natijalari mineral kompozitsiyali ampulalar zararli bug‘lar ajratib chiqarmasligi, nam jinslarda ishlash imkoniyati, shpurlarda komponentlarni oldindan aralashtirish zaruratining yo‘qligi va uzoq muddat davomida mahkamlash qobiliyatini saqlashi bilan polimer ampulalarga nisbatan

afzallikka ega ekanligini ko‘rsatdi. Ayniqsa, namlangan shpurlarda ampulalarni oldindan suvda ivitmasdan joylashtirish imkoniyati yer osti sharoitida texnologik jarayonni soddalashtiradi.

Xulosa. Olib borilgan tadqiqotlar mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalardan foydalanish yer osti kon lahimlarini ankerli mustahkamlashning texnologik samaradorligi va ishonchliligini oshirishini ko‘rsatdi. Ampula zichligining 600–2000 kg/m³ oralig‘ida ortishi mahkamlash mustahkamligini 8,2 MPa dan 36,8 MPa gacha oshirishi aniqlangan. Mineral kompozitsiyali ampulalar yuqori termik barqarorligi, yonmasligi, nam shpurlarda ishlash imkoniyati hamda uzoq muddat davomida mahkamlash xususiyatlarini saqlashi bilan polimer ampulalarga nisbatan qator afzalliklarga ega. Kichik diametrli shpurlardan foydalanish va ankerlarni qisqa vaqt ichida o‘rnatish imkoniyati mustahkamlash jarayonini soddalashtirib, ishlarning tezkorligini oshiradi. Olingan natijalar mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalarni murakkab kon-geologik sharoitlarda yer osti kon lahimlarining barqarorligi va xavfsizligini ta’minlash uchun samarali va istiqbolli mustahkamlash vositasi sifatida qo‘llash mumkinligini ko‘rsatadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

- [1] Касторных, Л. И. (2007). Добавки в бетоны и строительные растворы: Учебно-справочное пособие (2-е изд.). Феникс.
- [2] Брыков, А. С. (2009). Силикатные растворы и их применение: Учебное пособие. СПбГТИ(ТУ).
- [3] Мальцев, В. И., & Утрялов, О. А. (2007). Крепление горных выработок угольных шахт сталеполимерной анкерной крепью (В. В. Сеникус, Ред.). Наука.
- [4] Melikulov, A., Khasanov, O., Bakirov, G., Alimov, Sh., & Nurkhanov, H. (2025). Analysis of numerical calculation of rock pressure in underground mining works. AIP Conference Proceedings, 3304, 030060. <https://doi.org/10.1063/5.0269350>
- [5] Bakirov, G., Abdishukurovich, H., & Nurxonov, X. (2023). Assessment of the working conditions of a metal frame reinforced bender and control of its mode. Sanoatda Raqamli Texnologiyalar, 1(1), 64–70. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8374187>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Mislibayev, I. T., Bo‘riyev, F. M., Nizomov, T. N., & Nurxonov, X. A. (2026). Yer osti kon lahimlarini ankerli mustahkamlashda mineral kompozitsiyali ikki komponentli ampulalarning samaradorligini baholash. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.30>

UO‘K: 621.671:532.526

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.31

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

MARKAZDAN QOCHMA NASOS ISHCHI G‘ILDIRAGI KURAKLARINING YUZA TEKSTURASINI QIYOSIY TAHLIL QILISH VA SONLI BAHOLASH METODOLOGIYASI



Qurbonov Oybek Muhammadqulovich

Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti doktoranti, Navoiy, O‘zbekiston

E-mail: agent7001.oq@gmail.com

ORCID ID: 0009-0000-7699-0520

Science ID: FNV-0525-0033

Annotatsiya. Markazdan qochma nasoslarning gidravlik foydali ish koeffitsiyentini (FIK) oshirish energiya tejashning ustuvor vazifasi bo‘lib qolmoqda. Devor oldi oqimini boshqarishning istiqbolli passiv vositalaridan biri esa kuraklar yuzasini sun‘iy teksturalash hisoblanadi. Mazkur ishda teksturalarning ikki raqobatdosh oilasi — lokal chuqurchalar va bo‘ylama ariqchalar — modifikatsiyalangan yuzalar hamda aylanuvchi turbomashinaning oqim qismidagi oqimga doir to‘rtta mustaqil tadqiqot asosida qiyosiy tahlil qilingan. Chuqurchalar girdob hosil bo‘lishini, turbulent ko‘chishni kuchaytirishi va odatda ishqalanishni oshirishi, bo‘ylama ariqchalar esa ma‘lum bir parametrlar oralig‘ida oqim yadrosini qayta tuzib, urinma kuchlanishni pasaytirishi ko‘rsatilgan. Asosiy ziddiyat shundan iboratki, teksturalarning ikki oilasi bir-biriga mos kelmaydigan maqsadli funksiyalar (issiqlik uzatishga qarshi qarshilik) bo‘yicha va qo‘zg‘almas obyektlarda o‘rganilgan, holbuki ishchi g‘ildirakning vazifasi aylanuvchi egri chiziqli kanaldagi gidravlik yo‘qotishlarni minimallashtirishni talab qiladi. Kurakdagi teksturalarni qiyosiy baholashning yagona hisoblash metodologiyasi taklif etilgan bo‘lib, u o‘zida TEF-tipidagi murosali metrika, ishqalanish modifikatsiyasi koeffitsiyenti va aylanuvchi g‘ildirakni CFD-modellashtirishning ish jarayonini birlashtiradi. Ilmiy bo‘shliq, mexanizmlarni ko‘chirish gipotezalari va hisoblash tajribasi rejasi ta‘riflab berilgan.

Kalit so‘zlar: markazdan qochma nasos, ishchi g‘ildirak, sirtni teksturalash, sun‘iy chuqurchalar, bo‘ylama ariqchalar, gidravlik yo‘qotishlar, ishqalanishni modifikatsiyalash koeffitsiyenti, uyurmali struktura, hisoblash gidrodinamikasi, $k-\omega$ SST turbulentlik modeli, termogidravlik samaradorlik koeffitsiyenti.

Received: 03.09.2026

Accepted: 13.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

МЕТОДОЛОГИЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА И ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Қурбонов Ойбек Мухаммадқулович

Докторант Навоийского государственного горно-технологического университета, Навои, Узбекистан

Аннотация. Повышение гидравлического коэффициента полезного действия (КПД) центробежных насосов остаётся приоритетной задачей энергосбережения. Одним из перспективных пассивных средств управления пристеночным потоком является искусственное текстурирование поверхности лопаток. В данной работе проведён сравнительный анализ двух конкурирующих семейств текстур — локальных лунок и продольных канавок — на основе четырёх независимых исследований модифицированных поверхностей и потоков в проточной части вращающейся турбомашины. Показано, что лунки способствуют образованию вихрей, усиливают турбулентный перенос и обычно повышают трение, тогда как продольные канавки в определённом диапазоне параметров перестраивают ядро потока и снижают касательное напряжение. Основное противоречие заключается в том, что оба семейства текстур исследовались применительно к несовместимым целевым функциям (сопротивлению теплопередаче) и на неподвижных объектах, тогда как функционирование рабочего колеса требует минимизации гидравлических потерь в вращающемся криволинейном канале. Предложена единая расчётная методология сравнительной оценки текстур на лопатках, объединяющая компромиссную метрику типа TEF, коэффициент модификации трения и рабочий процесс CFD-моделирования рабочего колеса. Описаны научный пробел, гипотезы переноса механизмов и план вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: центробежный насос, рабочее колесо, текстурирование поверхности, искусственные лунки, продольные канавки, гидравлические потери, коэффициент модификации трения, вихревая структура, вычислительная гидродинамика, $k-\omega$ SST модель турбулентности, коэффициент термогидравлической эффективности.

METHODOLOGY FOR COMPARATIVE ANALYSIS AND NUMERICAL EVALUATION OF THE SURFACE TEXTURE OF CENTRIFUGAL PUMP IMPELLER BLADES

Kurbonov Oybek Muhammadkulovich

Doctoral Student, Navoi State University of Mining and Technologies, Navoi, Uzbekistan

Abstract. Increasing the hydraulic efficiency of centrifugal pumps remains a priority task for energy conservation. One promising passive method of controlling near-wall flow is the artificial texturing of blade surfaces. In this work, two competing families of textures—localized dimples and longitudinal grooves—are comparatively analyzed on the basis of four independent studies concerning modified surfaces and flow in the flow passage of a rotating turbomachine. It is shown that dimples promote vortex formation and turbulent transport and generally increase friction, whereas longitudinal grooves reorganize the flow core within a certain range of parameters and reduce shear stress. The main contradiction is that the two texture families have been studied according to incompatible target functions (resistance to heat transfer) and on stationary objects, whereas the function of an impeller requires minimizing hydraulic losses in a rotating curved channel. A unified computational methodology for the comparative assessment of blade textures is proposed, combining a TEF-type compromise metric, a friction modification coefficient, and a workflow for CFD modeling of an impeller. The scientific gap, hypotheses for transferring the mechanisms, and the computational experimental plan are described.

Keywords: centrifugal pump, impeller, surface texturing, artificial dimples, longitudinal grooves, hydraulic losses, friction modification coefficient, vortex structure, computational fluid dynamics, $k-\omega$ SST turbulence model, thermohydraulic efficiency coefficient.

Kirish. Nasos uskunalarining energiya iste'moli sanoat va qazib olish jarayonlarida salmoqli ulushni tashkil etadi, shu sababli ishchi g'ildirakning gidravlik foydali ish koeffitsiyentini (FIK) o'zgina oshirish ham sezilarli iqtisodiy samara beradi. G'ildirakning oqim qismidagi asosiy

yo'qotishlar devor yaqinidagi qatlamda ishqalanish, oqimning uzilishi va bosim gradienti hamda kuraklar egriligi ta'sirida shakllanadigan ikkilamchi oqimlar bilan bog'liqdir. Sirtni teksturalash vositalari yordamida devor yaqinidagi oqim strukturasini boshqarish qo'shimcha energiya talab qilmaydigan passiv usullarga kiradi, bu esa uni ishchi g'ildirak kuraklari uchun jozibador qiladi.

Hozirgacha to'plangan tajriba o'zaro kam kesishadigan ikkita yo'nalishga bo'linadi. Birinchi yo'nalish girdoblar hosil qilish va turbulentlikni oshirish hisobiga issiqlik almashinuvini jadallash-tiradigan mahalliy chuqurliklarni (o'yiqlarni) o'rganadi; bunda aksariyat konfiguratsiyalarda ishqalanish koeffitsiyenti ham ortadi va bu ikki effekt o'rtasidagi muvozanat *TEF* termogidravlik samaradorlik koeffitsiyenti bilan ifodalanadi [1, 2]. Ikkinchi yo'nalish turbulent oqimda oqim o'zagini qayta shakllantirish hisobiga qarshilikni *kamaytira* oladigan bo'ylama (oqim bo'ylab yo'nalgan) ariqchalarni ko'rib chiqadi, bu esa chuqurliklarning ta'siriga teskaridir [3]. Har ikki yo'nalish ham qo'zg'almas plastinalar va kanallar misolida rivojlantirilgan.

Aylanuvchi turbomashinalarni hisoblash usulida modellashtirishga doir ishlar alohida guruhni tashkil etadi. Ularda maqsadli funktsiya sifatida issiqlik uzatish emas, aynan gidravlik foydali ish koeffitsiyenti olinadi hamda oqim qismining geometriyasini qurishdan tortib, to'rga bog'liqlikni tekshirish va validatsiya qilishgacha bo'lgan to'liq CFD-tahlil sikli ishlab chiqilgan [4]. Biroq bunday ishlarda oqim qismining yuzasi silliq holda qoladi, sun'iy teksturalashning aylanuvchi g'ildirakdagi yo'qotishlarga ta'siri masalasi esa ko'tarilmaydi.

Mazkur yo'nalishlarning qiyoslanishi ilmiy ziddiyatni yuzaga chiqaradi: mohiyatan bir xil bo'lgan yechim — “devorni teksturalash” — teksturaning turi va yo'nalishiga qarab, bir-biriga zid gidravlik oqibatlarga olib keladi, oqibatlarning o'zi esa o'zaro nomutanosib mezonlar asosida va aylanmaydigan obyektlarda baholangan. Bu ma'lum natijalarni ishchi g'ildirak kuragiga bevosita ko'chirish imkonini bermaydi. Ushbu ishning maqsadi chuqurchalar va bo'ylama ariqchalarning ta'sir mexanizmlarini qiyosiy tahlil qilish hamda ularni markazdan qochma nasos ishchi g'ildiragi kuraklari yuzasida gidravlik

yo'qotishlarni minimallashtirish mezonini bo'yicha baholashning yagona raqamli metodologiyasini shakllantirishdan iborat.

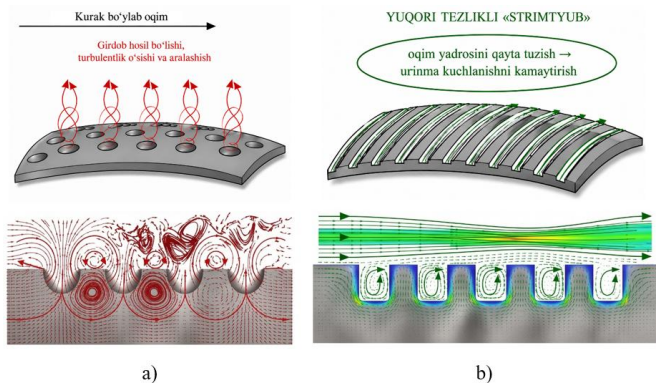
Materiallar va metodlar. Ko'rib chiqila-yotgan tadqiqotlarning taqqoslanishi shuni ko'rsatadiki, masala qo'yilishining tashqi o'xshash-ligiga (devoroldi geometriyasining modifikatsiyasi) qaramay, ular maqsad funksiyasi, ta'sir mexanizmi va ishqalanishga ta'sirining ishorasi bilan farqlanadi. Umumlashtirilgan qiyosiy matritsa 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

**To'rtta tadqiqotning qiyosiy matritsasi (1-4)
manbalari ma'lumotlariga ko'ra)**

Belgisi	Chuqurchalar + oqim [1]	Kanaldagi chuqurchalar [2]	Bo'ylama ariqchalar [3]	Turbina g'ildiragi [4]
Tekstura geometriyasi	Silindrsimon chuqurcha	Sferik chuqurcha	Bo'ylama ariqcha	Silliq oqim qismi
Ishchi muhit	Havo	Havo	Suyuqlik	Suv
Maqsad funksiyasi	Issiqlik uzatish (TEF)	Uyurmalar fizikasi	Qarshilik (F)	FIK, quvvat
Model / metod	Eksperiment + k-ε RNG	Eksperiment	RANS k-ω SST + DNS	RANS k-ω SST
Asosiy boshqaruvchi parametr	d, qadam, B masofa	δ/D chuqurlik	α, amplituda S, faza	geometriya, aylanish tezligi
Re diapazoni	1500–14 600	2100–20 000	2648–30 000	20–45 ayl/daqqa rejimlari
Ishqalanishga ta'siri	qoida tariqasida, ortishi	chuqurroq → yo'qotishlar ortadi	parametrlar oralig'ida — kamayishi	—
Mexanizm	chetki uyurma, turbulentlik	uyurma juftliklarining ajralib chiqishi	oqim yadrosining qayta shakllanishi	—
Aylanish / egrilik	yo'q	yo'q	yo'q	ha

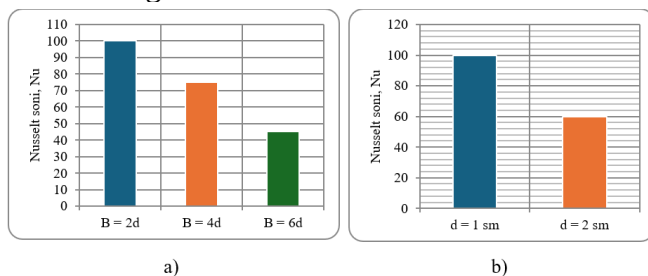
1-jadvaldan ko'rinib turibdiki, [1] va [2] tadqiqotlar **uyurmaviy (aralashtiruvchi) mexanizmi** ta'riflaydi: chuqurcha o'zining markaziy qismidan davriy ravishda birlamchi uyurma juftini chiqarib turadi, unga esa qirralar bo'ylab chetki uyurma juftliklari qo'shiladi; chuqurcha ta'siri devordan uning izi diametrining taxminan yarmigacha bo'lgan masofa bilan chegaralanadi [2]. [3] tadqiqotda esa tubdan farqli, **strimtyub (oqimli naycha) mexanizmi** tasvirlangan: bo'ylama ariqchalar oqim yadrosini kesimning keng qismida yuqori tezlikdagi oqimli naychalarga aylantirib, tor qismdagi urinma kuchlanishni keng qismda ortganiga nisbatan kuchliroq kamaytiradi, bu esa qarshilikning sof pasayishini ta'minlaydi [3]. Har ikki mexanizm 1-rasmda sxematik tarzda qiyoslangan.



1-rasm. Kurak yuzasini teksturalashning ikki raqobatdosh mexanizmi:

a – chuqurchalar; b – bo'ylama ariqchalar.

Uyurmaviy mexanizmning miqdoriy jihatida [1]-ma'lumotlar bilan tasdiqlanadi: silindrsimon chuqurchalarda Nusselt soni barcha rejimlar diapazonida silliq plastina uchun xos qiymatlardan oshadi, uning kattaligi esa oqim–devor masofasi va chuqurcha diametriga keskin bog'liq bo'ladi (2-rasm). Bunda issiqlik uzatishning ortishi ishqalanishning ortishi bilan birga kechadi — maksimal $TEF = 5,5$ ga eng yuqori issiqlik uzatishda emas, balki chuqurchaning kichik diametrda va o'rtacha ishqalanish nisbati $f/f_0 = 4$ bo'lganda erishiladi [1]. Bu shuni ko'rsatadiki, issiqlik almashinuvi emas, balki yo'qotishlar muhim bo'lgan tatbiqlar uchun uyurmaviy mexanizm umuman olganda samarasizdir.

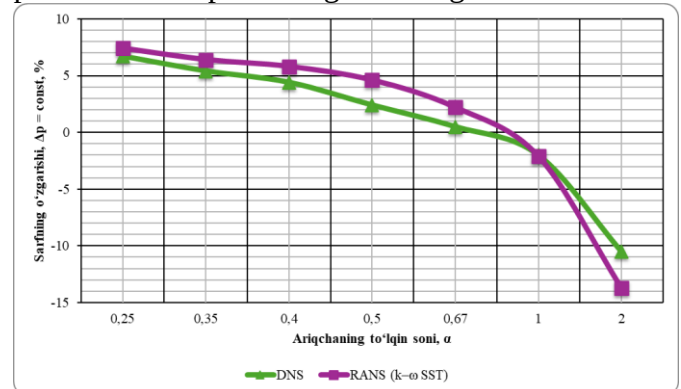


2-rasm. $Re = 14\,600$ bo'lganda silindrsimon chuqurchalarda issiqlik uzatishning jadallashuvi:

a – oqim–devor B masofasining ta'siri; b – chuqurcha d diametrining ta'siri.

Oqim naychalari mexanizmi [3] esa, aksincha, tekstura qarshilikni pasaytiradigan tor parametrlar “oynasi” mavjudligini namoyon etadi. DNS va RANS taqqoslash ma'lumotlariga ko'ra, qat'iy belgilangan bosimlar farqida sarfning o'zgarishi faqat ariqchaning kichik to'lqin sonlaridagina ijobiy (qarshilikning pasayishi) bo'lib, ularning ortishi

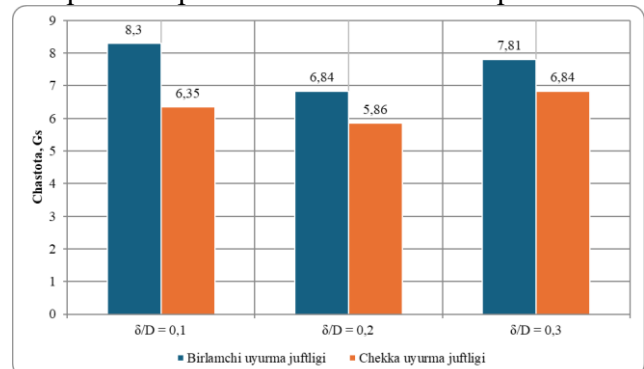
bilan o'z ishorasini o'zgartiradi (3-rasm). Turbulent oqimdagi qarshilikning pasayishi sinusoidal ariqchalar uchun taxminan 25 % ga, to'g'ri burchakli ariqchalar uchun esa ~40 % gacha yetadi [3]. Demak, g'ildirak uchun qulay samara yuzaga kelishi mumkin, biroq bu faqat to'g'ri yo'naltirilganda va cheklangan geometrik parametrlar diapazonidagina amalga oshadi.



3-rasm. Bo'ylama ariqchalar yordamida qarshilikni pasaytirish oynasi:

$S = 0,5$; qarama-qarshi fazali joylashuv, $\beta = \pi$.

[2]-ishda uyurma mexanizmi kuchi chuqurlashish darajasi bilan bog'lanadi: u ortgani sari uyurmalilik, sirkulyatsiya va Reynoldsning normal kuchlanishlari, shuningdek, to'liq bosim va bo'ylama tezlik tanqisliklari, ya'ni yo'qotishlar ham ortadi. Uyurmalarining otilish chastotalari (4-rasm) birlamchi juftlik uchun 7–9 Gs, chetki juftlik uchun esa 5–7 Gs oralig'ida bo'lib, chuqurlikka unchalik bog'liq emas, biroq uyurmalar intensivligi chuqurlikka sezilarli darajada bog'liqdir [2]. Demak, chuqurlik uyurma mexanizmining asosiy boshqaruvchi parametri bo'lib xizmat qiladi.



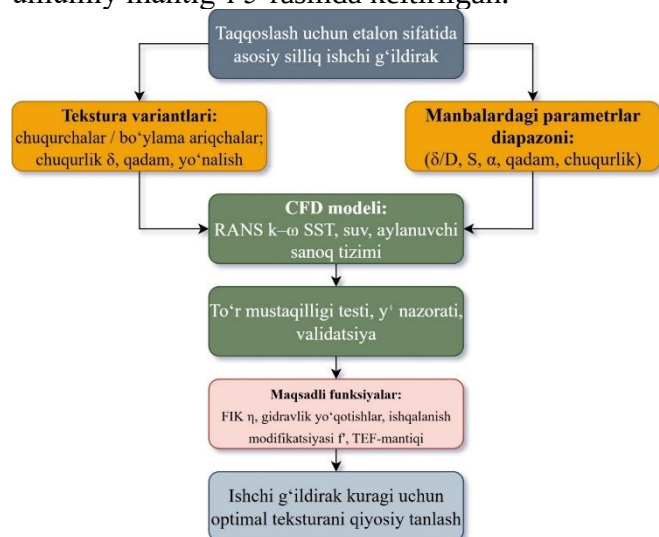
4-rasm. Botiqlikning nisbiy chuqurligiga bog'liq holda uyurmalarining otilish chastotalari.

Nihoyat, [4]-ishda aylanuvchi g'ildirakni

ishonchli sonli baholashga to'g'ri mustaqilligi va validatsiyani majburiy sinovdan o'tkazish sharti bilan RANS k- ω SST modelida erishish mumkinligi, maqsad funksiyasi sifatida esa gidravlik FIK olinishi ko'rsatilgan. Teksturalangan nasos g'ildiragi masalasiga tatbiq etish uchun to'liqlik turbinasi bo'yicha natijalarning o'zi emas, aynan shu ish jarayoni qimmatlidir.

Xulosa qilib aytganda, taqqoslash shuni ko'rsatadiki, to'plangan natijalarni mexanik tarzda birlashtirib bo'lmaydi: botiqlar va ariqchalar yo'qotishlarga ta'sirining ishorasi bo'yicha bir-biriga zid keladi, ular turli mezonlar asosida va aylanmaydigan obyektlarda baholangan, aylana-digan yagona holatda esa tekstura mavjud emas. Bu ushbu ishning tadqiqot obyekti belgilab beruvchi ilmiy bo'shliqni yuzaga keltiradi.

Tahlil uchun material sifatida [1-4] manbalardagi to'rtta mustaqil tadqiqot xizmat qildi. Ular chuqurcha va ariqchali yuzalar ustidan oqim, shuningdek, aylanuvchi ishchi g'ildirakni CFD-modellashtirish bo'yicha eksperimental va sonli ma'lumotlarni o'z ichiga oladi. Ishning uslubiy asosi — ushbu ma'lumotlarning qiyosiy sintezini amalga oshirish va shu asosda kuraklardagi teksturalarni baholashning yagona sonli metodologiyasini yaratishdir. Metodologiyaning umumiy mantiqi 5-rasmda keltirilgan.



5-rasm. Kurak teksturasini qiyosiy tadqiq etish uchun taklif etilayotgan metodologiya.

Etalon sifatida asosiy silliq ishchi g'ildirak qabul qilinadi va teksturalangan variantlar unga nisbatan baholanadi. Sonli model [4]-ishda ishlab

chiqilgan ish jarayoni bo'yicha tuziladi: Reynolds bo'yicha o'rtachalashtirilgan uzluksizlik va impuls tenglamalari k- ω SST turbulentlik modeli bilan yopiladi, muhit — suv, g'ildirakning aylanishi aylanuvchi sanoq tizimida hisobga olinadi; to'g'ri bog'liqlikdan holi bo'lish testi va devor oldi y' o'lchamini nazorat qilish hamda keyingi validatsiya [4] majburiy hisoblanadi. k- ω SST modelining tanlanishi [3]-ishga mos keladi, unda bu model tekstura ustidan oqim uchun DNSga nisbatan validatsiya qilingan.

Teksturalar samaradorligini baholash uchta kelishilgan metrikaga asoslanadi. [3]-ishga ko'ra ishqalanishni modifikatsiyalash koeffitsiyenti quyidagicha aniqlanadi:

$$f' = (f_1 - f_0) / f_0 \quad (1)$$

bunda f_1 va f_0 — Reynolds sonining bir xil qiymatida teksturalangan va silliq sirtlarning ishqalanish koeffitsiyentlari; f' ning manfiy qiymati yo'qotishlar kamayishini bildiradi [3]. [1] ga muvofiq, intensivikasiya va ishqalanish o'rtasidagi murosali yechim termogidravlik samaradorlik koeffitsiyenti

$$TEF = (Nu_b / Nu_0) / (f_b / f_0)^{1/3} \quad (2)$$

bu g'ildirak masalasida issiqlik uzatish ko'rsatkichi sifatida emas, balki foydali samara va ishqalanish "jarimasi" nisbatining rasmiy o'lchovi sifatida ishlatiladi. Uchinchi, ya'ni integral metrika sifatida g'ildirakning [4] metodikasi bo'yicha hisoblanadigan gidravlik foydali ish koeffitsiyenti (η) xizmat qiladi. (1), (2) va η ni birgalikda qo'llash tekstura variantlarini yagona yo'qotishlar shkalasi bo'yicha taqqoslash imkonini beradi.

2-jadval

Taklif etilayotgan sonli tajriba rejasi: omillar va darajalar

Omil	Belgilanishi	Darajalar ([1-3] diapazonlari bo'yicha)
Tekstura turi	—	chuqurchalar / bo'ylama ariqchalar
Nisbiy chuqurlik / amplituda	$\delta/D, S$	0,1; 0,2; 0,3 (chuqurchalar); 0,25–1,5 (ariqchalar)
Qadam / to'liqlik soni	E_r, E_0, α	qadam 2d–3d; $\alpha <$ chegaraviy qiymatdan
Yo'nalishi / faza	—	oqimga ko'ndalang / oqim bo'ylab; $\beta = \pi$
Reynolds soni	Re	oqim qismining rejim qiymatlari
Maqsadli funksiyalar	η, f', TEF	minimal yo'qotishlar / maksimal η

O'zgaruvchi omillar fazosi manbalarda belgilangan diapazonlardan shakllantirilgan va 2-jadvalda keltirilgan. Ta'kidlash joizki, jadval

olingan natijalarni emas, balki bo'lajak sonli tajribaning rejasini ifodalaydi.

Tadqiqot algoritmi quyidagilarni o'z ichiga oladi: parrakning bazaviy va teksturalangan geometriyalarini qurish; devor yaqinida zichlashtirilgan geksaedral to'rni generatsiyalash; to'r mustaqilligi testini o'tkazish va y^+ ni nazorat qilish; statsionar va zarur bo'lganda, nostatsionar hisob-kitoblarni bajarish; har bir variant uchun (1), (2) va η metrikalarini hisoblash; gidravlik yo'qotishlarni minimallashtiradigan konfiguratsiyani qiyosiy tanlab olish.

Tadqiqot natijalari va ularning muhokamasi. [1-3] manbalardagi ma'lumotlarni sintez qilish g'ildirak parragidagi har bir teksturaning mexanizmlari, metrikalari va kutilayotgan rolini qiyoslash imkonini beradi (3-jadval). "chuqurchalar" va "bo'ylama ariqchalar" ustunlaridagi belgilar va tendensiyalar qiymatlari [1-3] manbalardagi real ma'lumotlarga asoslanadi; g'ildirakka o'tkazish ustuni esa 3-bo'lim metodikasi bo'yicha sonli eksperiment orqali tekshirishni talab etuvchi asoslangan gipoteza sifatida shakllantirilgan.

3-jadval

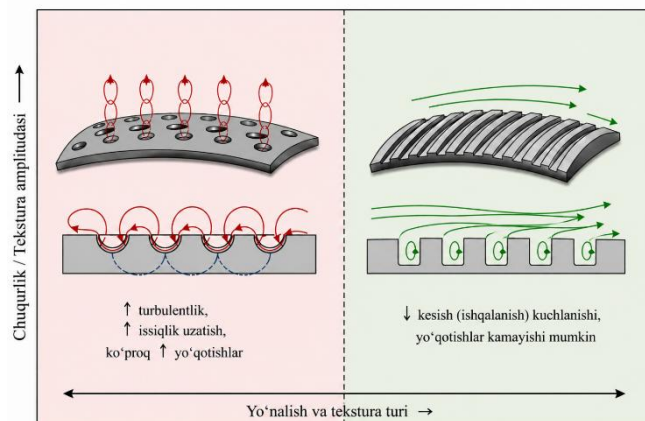
Mexanizmlar, metrikalar va nasos g'ildiragiga o'tkazishni qiyoslash

Jihat	Chuqurchalar [1], [2]	Bo'ylama ariqchalar [3]	G'ildirakka o'tkazish (gipoteza)
Birlamchi samara	uyurmalar chiqishi, turbulentlashuv	yadroning oqim naychalariga qayta tuzilishi	parrakning devor oldi qatlamini boshqarish
Metrika	TEF, Nu	f'	η, f'
Yo'qotishlarga ta'sir belgisi	ko'pincha ortish	parametrlar oralig'ida — kamayish	maqsadli — kamayish
Boshqaruvchi parametr	chuqurlik, diametr, qadam	to'lqin soni, amplituda	chuqurlik/amplituda, yo'nalish
Manbaning cheklovi	havo, aylanmasiz	ideal kanal, aylanmasiz	aylanuvchi g'ildirak uchun CFD talab qilinadi

Sintezning birinchi natijasi — yo'qotishlarga ta'sir belgisining qarama-qarshi ekani aniqlanganidir. [1] va [2] manbalaridagi ma'lumotlarga ko'ra, aksariyat konfiguratsiyalarda chuqurchalarning uyurma mexanizmi ishqalanishning ortishi bilan birga kechadi, bu esa g'ildirak uchun yo'qotishlarning ko'payishini anglatadi; aksincha, [3] manbasiga ko'ra, to'lqin sonlarining cheklangan diapazonidagi bo'ylama ariqchalar qarshilikning

kamayishini ta'minlaydi. Bundan kelib chiqadiki, g'ildirakning maqsadli funksiyasi (yo'qotishlarni minimallashtirish) uchun teksturaning bo'ylama yo'nalishi — parametrik oyna (3-rasm) shartlariga rioya qilingan taqdirda — mahalliy chuqurchalarga nisbatan potentsial afzalroqdir.

Ikkinchi natija — chuqurlik/amplitudaning umumiy boshqaruvchi parametr sifatida identifikatsiya qilinishidir. [2] manbadagi ma'lumotlar chuqurchalar chuqurligi ortishi bilan uyurmalar intensivligi va unga hamroh bosim tanqisliklarining monoton o'sishini, [3] manbadagi ma'lumotlar esa qulay oyna doirasida amplituda ortishi bilan ariqchalar samarasining kuchayishini ko'rsatadi. Bu ikkala mexanizmni boshqarishni yagona geometrik parametrga keltirish va rejimlarning sifat xaritasini (6-rasm) tuzish imkonini beradi.



6-rasm. Kurakni teksturalash rejimlari xaritasi: mexanizmlarning sifat sintezi.

Uchinchi natija — metrikalarning uslubiy jihatdan mos kelishidir. Ishqalanishni modifikatsiyalash koeffitsiyenti (1) va koeffitsiyent mantiqi (2) g'ildirakning integral foydali ish koeffitsiyenti η bilan birgalikda qo'llanib, yagona baholash shkalasini hosil qilishi mumkinligi ko'rsatilgan. Bu "issiqlik almashinuvi" va "qarshilik" an'analari o'rtasidagi tafovutni bartaraf etadi hamda har ikki yo'nalish natijalarini nasos masalasi kontekstida solishtirma qilish imkonini beradi.

Shu bilan birga, ishonchlilik chegarasini aniq ko'rsatib o'tish zarur. [1]–[4] manbalarda markazdan qochma nasosning teksturalangan ishchi g'ildiragi uchun foydali ish koeffitsiyenti (FIK), bosim maydonlari va ishqalanish koeffitsiyentining miqdoriy qiymatlari keltirilmagan, qo'zg'almas

plastinalar va kanallardagi ma'lumotlarni aylanuvchi egri chiziqli kanalga o'tkazish esa markazdan qochma va Koriolis kuchlari hamda kuchli bo'ylama bosim gradienti ta'siri tufayli avtomatik tarzda amalga oshmaydi. Shu sababli, bu kattaliklar bo'yicha ishonchli miqdoriy xulosa chiqarish uchun dastlabki ma'lumotlar yetarli emas, degan xulosaga kelish to'g'ri bo'ladi. 2-bo'lim metodikasi bo'yicha teksturali aylanuvchi g'ildirakning CFD-hisob-kitoblari natijalari va ularning model nasosda o'tkaziladigan eksperimental validatsiyasi zarur qo'shimcha ma'lumotlar hisoblanadi.

Yuzaga kelgan holat fizik mexanizmlardagi farqlar bilan izohlanadi. Lokal chuqurcha siljish qatlamining o'yi ustida davriy uzilishiga va uyurmalar juftining ajralib chiqishiga sabab bo'ladi [2]; bu uyurmalar aralashish va issiqlik uzatishni kuchaytiradi [1], biroq ayni vaqtda turbulent energiya hosil bo'lishini va natijada yo'qotishlarni oshiradi. Bo'ylama ariqcha esa bunday turdagi ko'ndalang uyurmalarini hosil qilmaydi, aksincha, bo'ylama impulsni qayta taqsimlab, ho'llangan perimetr bo'yicha o'rtacha urinma kuchlanishni kamaytiradi [3]. Aynan shuning uchun teksturalarning ikki turkumida yo'qotishlarga ta'sir belgilari qarama-qarshidir, bu esa ham [1], [2] ma'lumotlariga (f/f_0 ning ortishi), ham [3] ma'lumotlariga (parametrlar oralig'idagi manfiy f' qiymatlari) mos keladi.

Mazkur yondashuvning avvalgi ishlardan farqi maqsadli funksiyaning o'zgartirilganidadir. [1] va [2]-manbalarda tekstura issiqlik uzatish bo'yicha optimallashtiriladi, bunda ishqalanishning ortishi ehtimoliy holat sifatida TEF orqali hisobga olinadi; [3]-manbada esa qarshilik bo'yicha optimallashtiriladi, biroq bu qo'zg'almas ideal kanalda amalga oshiriladi. Ushbu ikki an'anani g'ildirakka tatbiq etish boshqa bir maqsadni — aylanish vaqtidagi gidravlik yo'qotishlarni minimallashtirishni, shuningdek, [4]-manbada ishonchli raqamli jarayoni ishlab chiqilgan yangi obyektga talab qiladi. Taklif etilayotgan rivojlanish aynan [4]-manbadagi maqsadli funksiyani [1] va [3]-manbalardagi metrikalar bilan birlashtirishdan iborat.

G'ildirak uchun "ariqchali" rejimning afzal ko'rilishining eng ehtimoliy sababi ariqchalar orientatsiyasining kuraklararo kanaldagi nisbiy

oqimning ustun yo'nalishiga mos kelishidadir. Bo'ylama tekstura asosiy oqimga minimal darajada ta'sir ko'rsatib, oqim yadrosini qayta shakllantirishga xizmat qiladi. Chuqurliklar esa ko'ndalang girdoblarni hosil qilib, qo'shimcha yo'qotishlarga olib keladi va bu faqat intensiv issiqlik va massa almashinuvi zarur bo'lgan joylardagina o'zini oqlashi mumkin. Shu bilan birga, kurakning oqim uzilishiga moyil bo'lgan qismlarida mahalliy girdob generatorlari vazifasini o'tovchi chuqurchalar uzilishning oldini olish uchun foydali bo'lishi mumkin — bu masala hozircha ochiq qolib, tekshirishni talab etadi.

Olingan natijalarning amaliy ahamiyati shundaki, ular tadqiqot uchun asosli yo'nalishni belgilab beradi: chuqurlik/amplitudani asosiy boshqaruvchi parametr sifatida hamda (1), (2), η metrikalarining yagona shkalasidan foydalangan holda, birinchi navbatda, to'lqin soni kichik bo'lgan bo'ylama yo'naltirilgan teksturalarni etalon silliq g'ildirak bilan taqqoslash lozim.

Xulosa. To'rtta mustaqil tadqiqotning qiyosiy tahlili shuni ko'rsatdiki, sun'iy chuqurchalar va bo'ylama ariqchalar yo'qotishlarga ta'siri bo'yicha fizik jihatdan turlicha va qarama-qarshi mexanizmlarni ishga soladi: chuqurchalar uyurma hosil bo'lishini kuchaytirib, odatda ishqalanishni oshirsa, bo'ylama ariqchalar cheklangan parametrlar oralig'ida oqim yadrosini qayta tuzish hisobiga qarshilikni kamaytiradi. Tekstura chuqurligi (amplitudasi) har ikki mexanizmning umumiy boshqaruvchi parametri sifatida ajratib ko'rsatilgan.

Ilmiy bo'shliq aniqlandi: ikki tekstura oilasi yagona maqsadli funktsiya ostida va aylanuvchi obyektga o'zaro taqqoslanmagan, mavjud yagona aylanuvchi obyektga doir tadqiqotda esa teksturalar qo'llanilmagan. Ushbu bo'shliqni to'ldirish maqsadida ishchi g'ildirak parragidagi teksturalarni baholashning yagona raqamli metodologiyasi taklif etildi. U ishqalanish modifikatsiyasi va termogidravlik samaradorlik metrikalarini aylanuvchi turbomashinani CFD-modellashtirishning ish jarayoni bilan birlashtiradi. Shuningdek, ko'chish gipotezalari, rejimlar xaritasi va raqamli tajriba rejasi shakllantirildi.

Teksturalangan g'ildirakning miqdoriy xarakteristikalari (FIK, bosim maydonlari, ishqalanish koeffitsiyenti) dastlabki materiallarda

mavjud emas, shu sababli tegishli qiymatlar keltirilmaydi. Ularni olish taklif etilgan metodika bo'yicha raqamli tajriba o'tkazishni va keyinchalik model nasosida eksperimental validatsiyani talab etadi, bu esa kelgusi ishlarning yo'nalishini belgilab beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Sriromreun, P., & Sriromreun, P. (2019). A numerical and experimental investigation of dimple effects on heat transfer enhancement with impinging jets. *Energies*, 12(5), Article 813. <https://doi.org/10.3390/en12050813>
- [2] Won, S. Y., & Ligrani, P. M. (2007). Flow characteristics along and above dimpled surfaces with three different dimple depths within a channel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 21(11), 1901–1909.
- [3] DeGroot, C. T., Wang, C., & Floryan, J. M. (2016). Drag reduction due to streamwise grooves in turbulent channel flow. *Journal of Fluids Engineering (ASME)*, 138(12), 121201. <https://doi.org/10.1115/1.4034098>
- [4] Weerakoon, A. H. S., Lee, Y.-H., & Assadi, M. (2023). Wave energy convertor for bilateral offshore wave flows: A computational fluid dynamics (CFD) study. *Sustainability*, 15(9), 7152. <https://doi.org/10.3390/su15097152>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Qurbonov, O. M. (2026). Markazdan qochma nasos ishchi g'ildiragi kuraklarining yuza teksturasini qiyosiy tahlil qilish va sonli baholash metodologiyasi. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.31>

УДК: 669.2:622.765

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.32

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОКИСЛЕННЫХ ЗАБАЛАНСОВЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛЬМАКЫР



Аскарров Аззам Муратович

Начальник Управления международного сотрудничества и координации инвестиционных проектов и локализации Министерства горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан, Алмалык, Узбекистан
E-mail: A.Askarov@mingeo.uz
ORCID ID: 0009-0001-8116-671X
Science ID: FTV-0926-0030



Ларионов Сергей Владимирович

Главный инженер АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат», Алмалык, Узбекистан
E-mail: s.larionov@agmk.uz
ORCID ID: 0009-0007-0681-6552
Science ID: MTV-0926-0058

Аннотация. Рассмотрены история освоения медно-порфирового месторождения Кальмакыр и предпосылки образования техногенных отвалов окисленных забалансовых руд. Показано, что длительная открытая разработка месторождения сопровождалась селективным складированием сырья, не соответствовавшего требованиям действующей флотационной технологии. На примере отвалов № 9 и № 39 охарактеризован ресурсный потенциал накопленных руд, содержащих медь, золото и серебро. Проанализированы минералогические и технологические особенности окисленного сырья, ограничивающие прямое применение традиционной сульфидной флотации. Обоснованы перспективные направления развития: геолого-технологическое картирование отвалов, раздельная подготовка технологических типов, сернокислотное кучное и чановое выщелачивание, комбинированные схемы извлечения меди и благородных металлов, оборот растворов и цифровой контроль процессов. Результаты лабораторных опытов показывают возможность извлечения 75–80 % меди при чановом выщелачивании, однако промышленная реализация требует укрупнённых испытаний, замкнутого материального баланса и технико-экономического сравнения вариантов.

Ключевые слова: Кальмакыр, окисленные медные руды, забалансовые руды, техногенные отвалы, малахит, хризокolla, кучное выщелачивание, чановое выщелачивание, медь, золото, серебро.

Received: 07.09.2026

Accepted: 13.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

QALMOQQIR KONINING OKSIDLANGAN BALANS DAN TASHQARI RUDALARINI SHAKLLANTIRISH TARIXI VA QAYTA ISHLASH ISTIQBOLLARI

Askarov Agzam Muratovich

*O'zbekiston Respublikasi Tog'-kon sanoati va geologiya vazirligi,
Xalqaro hamkorlik, investitsiya loyihalarini muvofiqlashtirish va
mahalliyashtirish boshqarmasi boshlig'i, Olmaliq, O'zbekiston*

Larionov Sergey Vladimirovich

*"Olmaliq kon-metallurgiya kombinati" AJ bosh muhandisi,
Olmaliq, O'zbekiston*

Annotatsiya. Qalmoqqir mis-porfir konini o'zlashtirish tarixi va oksidlangan balansdan tashqari ma'danlarning texnogen uyumlari hosil bo'lishining shart-sharoitlari ko'rib chiqilgan. Konni uzoq vaqt davomida ochiq usulda qazib olish amaldagi flotatsiya texnologiyasi talablariga javob bermaydigan xomashyoni tanlab to'plash bilan birga olib borilganligi ko'rsatilgan. № 9 va № 39 uyumlari misolida tarkibida mis, oltin va kumush bo'lgan to'plangan ma'danlarning resurs salohiyati tavsiflangan. An'anaviy sulfidli flotatsiyani to'g'ridan-to'g'ri qo'llashni cheklaydigan oksidlangan xomashyoning mineralogik va texnologik xususiyatlari tahlil qilingan. Rivojlanishning istiqbolli yo'nalishlari asoslangan: ag'darmalarni geologik-texnologik xaritalash, texnologik turlarni alohida tayyorlash, sulfat kislotali uyumli va chanli tanlab eritish, mis va nodir metallarni ajratib olishning kombinatsiyalangan sxemalari, eritmalar aylanishi va jarayonlarni raqamli nazorat qilish. Laboratoriya tajribalari natijalari shuni ko'rsatadiki, chanli tanlab eritishda 75-80% mis ajratib olish mumkin, biroq sanoatda amalga oshirish uchun yiriklashtirilgan sinovlar, yopiq moddiy balans va variantlarni texnik-iqtisodiy jihatdan taqqoslash talab etiladi.

Kalit so'zlar: Qalmoqqir, oksidlangan mis rudalari, balansdan tashqari rudalar, texnogen ag'darmalar, malaxit, xrizokolla, uyumli tanlab eritish, chanli tanlab eritish, mis, oltin, kumush.

HISTORY OF FORMATION AND PROSPECTS FOR PROCESSING OXIDIZED OFF-BALANCE ORE OF THE KALMAKYR DEPOSIT

Askarov Agzam Muratovich

*Head of the Department for International Cooperation,
Coordination of Investment Projects and Localization, Ministry of
Mining Industry and Geology of the Republic of Uzbekistan,
Almalyk, Uzbekistan*

Larionov Sergey Vladimirovich

*Chief Engineer, JSC "Almalyk Mining and Metallurgical
Complex", Almalyk, Uzbekistan*

Abstract. The history of the development of the Kalmakyr copper-porphyry deposit and the prerequisites for the formation of technogenic dumps of oxidized off-balance ore have been examined. It has been shown that long-term open-pit development of the deposit was accompanied by the selective storage of raw materials that did not meet the requirements of current flotation technology. Using dumps No 9 and No 39, the resource potential of accumulated ores containing copper, gold, and silver is characterized. The mineralogical and technological characteristics of oxidized raw materials, which limit the direct application of traditional sulfide flotation, have been analyzed. Promising development directions have been substantiated: geological and technological mapping of dumps, separate preparation of technological types, sulfuric acid bulk and tank leaching, combined schemes for extracting copper and noble metals, solution circulation, and digital process control. Laboratory experiments show that 75–80% of copper can be extracted during tank leaching, but industrial implementation requires enlarged testing, a closed material balance, and a technical-economic comparison of the variants.

Keywords: Kalmakyr, oxidized copper ores, off-balance ore, technogenic tailings, malachite, chrysocolla, bulk leaching, tank leaching, copper, gold, silver.

Введение. Месторождение Кальмакыр сформировало минерально-сырьевую основу медной промышленности Алмалыка. За десятилетия эксплуатации приоритет отдавался сульфидным медно-молибденовым рудам, пригодным для флотационного обогащения. Окисленные и смешанные разновидности с

пониженным содержанием меди часто относили к забалансовому сырью и складировали во внешних отвалах. Изменение ценности металлов, развитие гидрометаллургии и рост требований к комплексному использованию недр позволяют рассматривать эти накопления как самостоятельный техногенный ресурс.

Цель статьи состоит в обобщении истории формирования отвалов окисленных забалансовых руд Кальмакыра и определении технологических и организационных условий их промышленного освоения.

История освоения месторождения Кальмакыр. Кальмакыр относится к крупным медно-порфировым объектам Алмалыкского рудного района Срединного Тянь-Шаня. Промышленную ценность имеют медь, молибден, золото и серебро, а также сера, селен, теллур и рений. Месторождение разрабатывается открытым способом с транспортированием руды на обогатительные фабрики и вывозом вскрышных пород во внешние отвалы [1].

Строительство карьера началось в 1954 г. Акт о вводе первой очереди рудника был подписан 1 июля 1959 г. Первый проект отработки подготовил институт «Гипруда», а последующее проектирование и расширение выполнял институт «Гипроцветмет». Уже в 1960-е годы росли глубина и масштаб горных работ, обновлялись буровые станки, экскаваторы и транспорт [1].

Таблица 1.

Основные этапы освоения Кальмакыра и развития медного производства

Период	Событие	Значение для окисленных руд
1954	Начало строительства карьера Кальмакыр	Начало масштабного вскрытия верхней окисленной зоны
1 июля 1959	Ввод первой очереди рудника	Переход к систематической промышленной эксплуатации
1960-е годы	Расширение карьера и механизация горных работ	Рост объема селективно складированного некондиционного сырья
1961–1970	Основной период накопления части окисленных руд по опубликованным данным	Формирование крупных техногенных отвалов
2021–2026	Строительство и ввод новых обогатительных мощностей АГМК	Рост потребности в комплексном управлении минерально-сырьевой базой
После 2026	Развитие МОФ-4 и последующих мощностей	Возможность интеграции отдельных гидрометаллургических потоков и инфраструктуры

Развитие производственной базы было ориентировано на устойчивое снабжение медной обогатительной фабрики и медепла-

вильного завода. В этот период технологическая классификация запасов определялась возможностями массовой флотации сульфидного сырья. Окисленные минералы меди хуже взаимодействуют с традиционными сульфидными собирателями; поэтому значительная часть окисленных и смешанных руд не обеспечивала требуемые показатели и складировалась отдельно.

Происхождение и статус забалансовых окисленных руд. Окисленная зона месторождения возникла в результате гипергенного изменения первичных сульфидов в приповерхностных условиях. Медь перераспределялась с образованием малахита, азурита, хризоколлы, куприта, брошантита, псевдомалахита и вторичных сульфидов. Железо представлено гетитом, гидрогетитом и гематитом. Такая минералогическая неоднородность определяет различную растворимость меди и затрудняет применение одного режима ко всему объему сырья.

Понятие «забалансовая руда» отражает экономические и технологические условия конкретного периода. Оно не означает отсутствия полезных компонентов. Руда могла быть отнесена к забалансовой из-за низкого содержания меди, высокой степени окисления, неблагоприятной минералогии, сложностей обогащения или отсутствия отдельной технологической линии. При изменении цен, оборудования и реагентных схем часть таких запасов может перейти в промышленно извлекаемый ресурс.

По опубликованным данным на начало 2000-х годов на АГМК учитывалось около 46 млн т добытой окисленной медной руды, складированной преимущественно в 1961–1970 гг. в девяти отвалах; среднее содержание меди приводилось на уровне 0,455%, а в части балансового сырья — 0,827% [2]. Эти исторические оценки требуют актуализации, поскольку состояние отвалов, контуры, влажность и качество сырья могли измениться.

Ресурсный потенциал отвалов № 9 и № 39. По данным проведенных исследований, в отвалах № 9 и № 39 сосредоточено 5 219,1 тыс. т окисленной руды. Учётное количество составляет 39,4 тыс. т меди, около 6,03 т золота и

19,8 т серебра. В пробах содержание меди изменялось от 0,41 до 0,80% для отвала № 9 и от 0,75 до 0,83% для отвала № 39. Доля сульфидной меди оценена в 10–12%. Золото исследованных пробах составляло 1,40–1,60 г/т и 1,03–1,58 г/т соответственно.

Таблица 2.

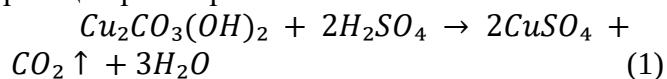
**Учётные показатели окисленных руд
отвалов № 9 и № 39**

Отвал	Руда, тыс. т	Медь, тыс. т	Золото, т	Серебро, т	Среднее Cu, %
№ 9	3 806,1	27,4	4,247	13,8	0,720
№ 39	1 413,0	12,0	1,790	6,0	0,849
Всего	5 219,1	39,4	6,037	19,8	—

Минералого - технологические особенности. Исследования вещественного состава показывают, что 92–95% массы окисленных руд образуют породообразующие минералы. Преобладают кварц и полевые шпаты; присутствуют серицит, хлорит, биотит, каолинит и другие глинисто-слюдистые минералы [3]. Суммарное содержание глинисто-слюдистых минералов в отдельных пробах достигает 23,5–32,3%, что повышает склонность материала к ошламованию и ухудшает фильтрацию и перколяцию растворов.

Степень окисления по меди в исследованных пробах оценивалась примерно в 61%, поэтому часть материала фактически относится к смешанным рудам [3]. Это важно для выбора процесса: легкорастворимые карбонатные и оксидные минералы переходят в сернокислый раствор сравнительно быстро, хризокolla и медь в силикатной матрице растворяются медленнее, а остаточные сульфиды требуют окислительных условий.

Для карбонатных минералов типична реакция растворения малахита:



Куприт в сернокислой среде может растворяться с образованием сульфата меди и металлической меди, а присутствие кислорода способствует дальнейшему окислению металлической меди. Породные карбонаты и железосодержащие минералы расходуют кислоту и увеличивают количество примесей в продуктивном растворе. Поэтому расход кислоты нельзя определять только по содержанию меди.

Опыт технологических исследований. Агитационное сернокислотное выщелачивание окисленных руд Кальмакыра исследуется как способ быстрого извлечения меди из тонкоизмельчённого сырья. В работе Д. Б. Холикулова с соавторами рассмотрены влияние крупности и концентрации кислоты, состав раствора и кека [2]. Более поздние исследования И. Б. Турамуратова с соавторами показали извлечение меди 65,9% при кучном и 80 % при чановом выщелачивании в оптимальных условиях [4].

В лабораторных опытах с пробами отвалов № 9 и № 39 при концентрации H_2SO_4 40–50 г/л, отношении Т:Ж = 1:4, продолжительности 1,5–2 ч и подаче воздуха извлечение меди составляло преимущественно 75–80%, а в отдельных пробах достигало более высоких значений. Для руды отвала № 39 при 50 г/л H_2SO_4 , температуре 35–45 °С и продолжительности 2 ч получено 78,6% для класса +1 мм и 79,4% для класса –1 мм. Это указывает на ограниченное влияние крупности в испытанном узком диапазоне при достаточно интенсивном режиме.

После удаления меди твёрдый остаток сохраняет золото и серебро. Испытания показали более высокую результативность цианирования по сравнению с глициновым выщелачиванием: извлечение золота достигало 84–88%, серебра — 42–60%. Такая последовательность требует тщательной промывки и нейтрализации кислого кека перед цианированием, отдельного оборота растворов и обязательного обезвреживания цианид-содержащих продуктов.

Перспективные технологии переработки. Промышленная схема должна учитывать неоднородность отвалов и различие между задачами быстрого извлечения и низкой себестоимости. Чановое выщелачивание обеспечивает высокую скорость и управляемость, но требует тонкого измельчения, большого реакторного объёма, фильтрации и повышенных капитальных затрат. Кучное выщелачивание проще масштабируется для миллионов тонн, однако зависит от проницаемости штабеля, гранулометрии, агломерации и продолжительности цикла.

Таблица 3.
Сравнение направлений переработки окисленных забалансовых руд

Технология	Преимущества	Ограничения	Рациональная область применения
Кучное выщелачивание	Низкие капитальные затраты на единицу руды; большой масштаб	Длительный цикл; каналообразование; чувствительность к шламам	Бедные проницаемые руды после дробления и агломерации
Чановое выщелачивание	Высокая скорость; контроль pH, температуры и аэрации	Тонкое измельчение; реакторы; фильтрация; высокий расход энергии	Более богатые и труднорастворимые селективные партии
Флотация окисленных минералов	Получение концентрата; возможность применения существующей инфраструктуры	Сложная реагентная схема; низкая селективность; хризоколлы; ошламование	Смешанные руды с заметной долей сульфидов
Комбинированная схема	Раздельное извлечение Cu, Au и Ag; гибкость по типам сырья	Несколько контуров растворов; сложный водный баланс	Усредненное сырьё после геометаллургической классификации

Приоритеты дальнейшего развития

Инвентаризация и геометаллургическое картирование. Первым этапом должна стать актуализация объёма и качества каждого отвала. Требуется топографическая съёмка, бурение или систематическое опробование, определение влажности и насыпной плотности, фазовый анализ меди, минералогия, кислотопотребление и распределение золота и серебра. Простого среднего содержания недостаточно: проектирование должно опираться на трёхмерную модель технологических типов сырья.

Укрупнённые испытания и пилотный участок. Лабораторное извлечение подтверждает принципиальную возможность процесса, но не определяет промышленную экономику. Необходимы колонные и опытно-кучные испытания, тесты агломерации, измерение перколяции, укрупнённое чановое выщелачивание и полный материальный баланс. Пилотная программа должна установить удельный расход H_2SO_4 , воды и электроэнергии, накопление железа и алюминия в растворе, извлечение по времени и качество конечного продукта.

Получение товарной меди из растворов.

Для продуктивных растворов перспективна схема жидкостной экстракции и электролиза SX–EW. Она позволяет отделить медь от части примесей, вернуть рафинат на выщелачивание и получить катодную медь. Возможность внедрения зависит от концентрации меди, кислотности, содержания железа, хлоридов и органических примесей. При менее концентри-

рованных растворах следует сравнить цементацию, сорбцию и другие способы концентрирования.

Вода, экология и рекультивация.

Разработка отвалов должна проектироваться как экологический проект с управляемым водным балансом. Основание штабелей и площадки растворов должны исключать инфильтрацию, а ливневые и технологические воды — собираться и возвращаться в процесс. После извлечения металлов необходимо оценить кислотогенирующий потенциал остатка, устойчивость примесей и возможность технической рекультивации.

Таблица 4.

Предлагаемая последовательность освоения отвалов

Этап	Основные работы	Результат
Аудит сырья	Съёмка, опробование, фазовый анализ, 3D-модель	Достоверные запасы и технологические домены
Лабораторная программа	Кислотопотребление, кинетика, перколяция, извлечение Au и Ag	Диапазоны оптимальных режимов
Пилотные испытания	Опытная куча и укрупнённое чановое выщелачивание	Баланс металлов, воды, кислоты и примесей
ТЭО	Сравнение CAPEX, OPEX, производительности и экологических рисков	Выбор промышленной схемы
Очередное внедрение	Селективная выемка наиболее благоприятных участков	Снижение риска и раннее получение продукции
Масштабирование	Расширение мощности и интеграция оборотных растворов	Стабильная переработка техногенного сырья

Интеграция с развитием АГМК.

Расширение АГМК формирует инфраструктурные предпосылки для вовлечения вторичного минерального сырья. В 2024 г. началось строительство МОФ-4, проектная продукция которой оценивается в 146 тыс. т катодной меди, 13 т золота и 73 т серебра в год [5]. В марте 2026 г. введена первая очередь МОФ-3, рассчитанная на переработку 60 млн т руды и получение около 900 тыс. т медного концентрата в год [6]. Эти проекты ориентированы на крупномасштабное рудное производство, но созданные энергетические, транспортные, ремонтные и кадровые мощности могут поддержать отдельный гидрометаллургический комплекс для окисленных руд.

Прямое смешение окисленного сырья с сульфидной рудой на флотационных фабриках целесообразно только после технологического подтверждения. Более обоснованным представляется выделение самостоятельного потока с собственными узлами дробления, агломерации или измельчения, выщелачивания, очистки растворов и получения меди.

Заключение:

1. История отвалов окисленных руд непосредственно связана с освоением верхней части Кальмакырского месторождения после начала строительства карьера в 1954 г. и ввода первой очереди в 1959 г.

2. Исторически забалансовый статус определялся требованиями флотационной технологии и экономикой своего времени. Современные гидрометаллургические методы позволяют пересмотреть промышленную ценность части складированного сырья.

3. Отвалы № 9 и № 39 содержат значительный объем руды и сопутствующие золото и серебро. До проектирования

необходимо сверить учётные показатели и создать геометаллургическую модель.

4. Минералогическая неоднородность, высокая доля кварца и глинисто-слюдистых минералов, а также сочетание окисленных и остаточных сульфидных фаз требуют разделения сырья на технологические типы.

5. Для массового бедного сырья наиболее масштабируемым направлением является кучное выщелачивание; чановый процесс целесообразно оценивать для более богатых или труднорастворимых селективных потоков.

6. Промышленное решение должно включать извлечение меди из растворов, обращение с золотосодержащим остатком, оборот воды, обезвреживание реагентов и рекультивацию переработанных отвалов.

7. Ближайшей практической задачей является создание пилотного участка и получение замкнутого материального баланса, на основании которого можно подготовить достоверное технико-экономическое обоснование.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] АО «Алмалыкский ГМК». (n.d.). Рудуправление «Кальмакыр». Retrieved September 9, 2026, from Алмалыкский ГМК — Рудуправление «Кальмакыр»
- [2] Холикулов, Д. Б., Ниязметов, Б. Е., Бекбутаев, А. Н., & Гайратов, Б. Г. (2022). Исследование по извлечению меди из окисленных руд АО «Алмалыкский ГМК» агитационным серноокислотным выщелачиванием. *Universum: Технические науки*, (1[94]). Статья
- [3] Холикулов, Д. Б., и др. (2025). Оценка вещественного состава окисленных медных руд месторождения Кальмакыр. Научная публикация. Статья
- [4] Турамуратов, И. Б., Усенов, Р. Б., Алматов, И. М., & Нурмухамедов, И. С. (2025). Исследование возможности гидрометаллургической переработки окисленных медных руд месторождения Кальмакыр. Обогащение руд, (3). <https://doi.org/10.17580/or.2025.03.04>
- [5] Президент Республики Узбекистан. (2024, October 15). На Алмалыкском горно-металлургическом комбинате начато строительство 4-й медно-обоганительной фабрики. Официальный веб-сайт Президента Республики Узбекистан
- [6] Президент Республики Узбекистан. (2026, March 16). В Алмалыке запущена первая очередь новой медно-обоганительной фабрики. Официальный веб-сайт Президента Республики Узбекистан
- [7] Zhao, X. B., et al. (2017). The porphyry Cu–Au/Mo deposits of Central Eurasia. 2. The Almalyk (Kalmakyr–Dalnee) and Saukbulak Cu–Au porphyry systems, Uzbekistan. *Ore Geology Reviews*.
- [8] Liu, Y., et al. (2023). Contrasting apatite geochemistry between ore-bearing and ore-barren intrusions in the Kalmakyr porphyry Cu–Au deposit, Uzbekistan. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1162994. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1162994>
- [9] Санакулов, К. С. (2009). Перспективы переработки окисленных медных руд месторождения Кальмакыр. Горный вестник Узбекистана, (3), 47–50.

- [10] Холикулов, Д. Б., Бекбутаев, А. Н., Ниязметов, Б. Е., & Нормуротов, Р. И. (2021). Переработка окисленных медных руд месторождения Кальмакыр. In Техноген-2021: Труды V Конгресса с международным участием (pp. 132–135). УрО РАН.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Аскарлов, А. М., & Ларионов, С. В. (2026). История формирования и перспективы переработки окисленных забалансовых руд месторождения Кальмакыр. Цифровые технологии в промышленности, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.32>

UO‘K: 622.841.225

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.34

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

KON LAHIMLARINING SUVLANGANLIGINI ANIQLASH VA UNING TURG‘UNLIGIGA TA’SIRINI BAHOLASH



Toshtemirov Umarali
Tulqin o‘g‘li

Olmalıq davlat texnika instituti
“Konchilik ishi” kafedrası dotsenti,
texnika fanlari bo‘yicha falsafa
doktori (PhD), Olmalıq,
O‘zbekiston
E-mail:
toshtemirovumarali77@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-0057-4149
Science ID: FSN-0425-0014



Qosimov Muhiddin
Odilovich

Milliy texnologik tadqiqotlar
universiteti MISIning Olmalıq
shahridagi filiali “Konchilik ishi”
kafedrası dotsenti, iqtisod fanlari
nomzodi, Olmalıq, O‘zbekiston
E-mail:
kosimovmuhiddin25@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-8108-4950
Science ID: FFR-0326-0022



Yormatov Ozodbek
Shermuhimmat o‘g‘li

“Multinational mine group” MCHJ
xorijiy korxonasida rejalashtirish
bo‘yicha mutaxassis, Olmalıq,
O‘zbekiston
E-mail:
yormatovozodbek@gmail.com
ORCID ID: 0009-0005-1256-908X
Science ID: MSD-0826-0079



Bo‘riyev Feruz Mansur
o‘g‘li

“NKMK” AJ Janubiy kon
boshqarmasi O‘quv-kurs kombinati
ishlab chiqarish ta’limi katta ustasi,
Olmalıq, O‘zbekiston
E-mail: boriyevferuz2@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-7569-3688
Science ID: MJZ-0426-0031

Annotatsiya. Mazkur maqolada kon lahimlarining suvlanganlik darajasini aniqlash hamda uning yer osti kon inshootlari turg‘unligiga ta’sirini baholash masalalari ko‘rib chiqilgan. Tadqiqot jarayonida yer osti suvlarining tog‘ jinslarining fizik-mexanik xususiyatlariga, jumladan mustahkamlik ko‘rsatkichlari, g‘ovaklik bosimi va deformatsion holatiga ta’siri tahlil qilingan. Kon lahimlari atrofidagi suvlanish zonalarini aniqlashda vizual kuzatuvlar, laboratoriya sinovlari va gidrogeologik tadqiqot usullaridan foydalanish imkoniyatlari yoritilgan. Shuningdek, suvlanishning salbiy oqibatlarini kamaytirish va kon lahimlarining uzoq muddatli turg‘unligini ta’minlash uchun drenaj tizimlarini tashkil etish, in’eksiya ishlari hamda zamonaviy mustahkamlash usullaridan foydalanish bo‘yicha tavsiyalar ishlab chiqilgan. Tadqiqot natijalari kon-geologik sharoitlarda gidrogeologik xavflarni oldindan baholash va xavfsiz qazib olish ishlarini tashkil etishda amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so‘zlar: kon lahimi, suvlanganlik, turg‘unlik, tog‘ jinslari, gidrogeologik sharoit, fizik-mexanik xossalalar, yer osti suvlari, mustahkamlash.

Received: 28.08.2026

Accepted: 16.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБВОДНЕННОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И ОЦЕНКА ЕЁ ВЛИЯНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ

Тоштемиров Умарали
Тулкинович

Доцент кафедры «Горное дело»
Алмалыкского государственного
технического института,
доктор философии (PhD) по
техническим наукам, Алмалык,
Узбекистан

Косимов Мухиддин
Одилович

Доцент кафедры «Горное дело»
филиала НИТУ «МИСИС» в
городе Алмалык, кандидат
экономических наук, Алмалык,
Узбекистан

Ярматов Озodbek
Шермухаммат угли

Специалист по планированию
иностранного предприятия ООО
«Multinational mine group»,
Алмалык, Узбекистан

Буриев Феруз Мансур
угли

Старший мастер
производственного обучения
Учебно-курсового комбината
Южного рудоуправления АО
«НГМК», Алмалык, Узбекистан

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы определения степени обводнённости горных выработок и оценки её влияния на устойчивость подземных горных сооружений. В ходе исследования проанализировано воздействие подземных вод на физико-механические свойства горных пород, включая изменение прочностных характеристик, порового давления и деформационного состояния массива. Рассмотрены возможности применения визуальных наблюдений, лабораторных испытаний и гидрогеологических методов для выявления зон обводнения в массиве вокруг горных выработок. Предложены рекомендации по снижению негативного влияния водоносности за счёт применения эффективных инженерно-технических мероприятий, включая устройство дренажных систем, проведение инъекционных работ и использование современных видов крепления. Полученные результаты имеют практическое значение для прогнозирования гидрогеологических рисков и обеспечения безопасной эксплуатации подземных горных объектов.

Ключевые слова: горная выработка, обводнённость, устойчивость, горные породы, гидрогеологические условия, физико-механические свойства, подземные воды, крепление.

DETERMINATION OF WATER SATURATION OF MINE WORKINGS AND ASSESSMENT OF ITS IMPACT ON STABILITY

**Toshtemirov Umarali
Tulqin ogli**

Associate Professor, Department of
Mining Engineering, Almalyk State
Technical Institute, PhD in
Technical Sciences, Almalyk,
Uzbekistan

**Kosimov Mukhiddin
Odilovich**

Associate Professor, Department of
Mining Engineering, Almalyk
Branch of National University of
Science and Technology "MISIS",
Candidate of Economic Sciences,
Almalyk, Uzbekistan

**Yormatov Ozodbek
Shermuhammat ugli**

Planning Specialist at the foreign
enterprise LLC "Multinational
Mine Group", Almalyk, Uzbekistan

**Boriyev Feruz Mansur
ugli**

Senior Industrial Training
Instructor, Training and Course
Center of the Southern Mining
Administration, JSC "NMMC",
Almalyk, Uzbekistan

Abstract. This article discusses the determination of water saturation levels in mine workings and the assessment of their influence on the stability of underground mining structures. The study analyzes the impact of groundwater on the physical and mechanical properties of rocks, including changes in strength characteristics, pore pressure, and deformation behavior of the rock mass. The application of visual observations, laboratory investigations, and hydrogeological methods for identifying water-saturated zones around mine workings is considered. Recommendations are proposed to reduce the negative effects of water inflow and ensure long-term stability of underground workings through effective engineering measures, including drainage systems, grouting operations, and modern support technologies. The obtained results are important for predicting hydrogeological risks and improving the safety of underground mining operations.

Keywords: mine working, water saturation, stability, rock mass, hydrogeological conditions, physical and mechanical properties, groundwater, support systems.

Kirish. Tog' jinslari massivining gidrogeologik sharoitlari kon ishlarining holatiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Kon lahimlari qazib o'tilganda, ularning atrofdagi tog' jinslari massivdagi tabiiy muvozanat buziladi. Agar lahim o'tkazilayotgan hudud suvli qatlamlarga to'g'ri kelsa yoki yer osti suvlari sizib kelsa, tog' jinslarning namlanishi boshlanadi. Suv tog' jinslarning minerallararo bog'lanish kuchini zaiflashtiradi, g'ovaklik bosimini oshiradi va natijada kon lahimlari mustahkamlagichlari hamda lahim devorlarining yemirilish jarayonini

tezlashtiradi. Shu sababli, kon lahimlarining suvlanganlik darajasini o'z vaqtida aniqlash va uning turg'unlikka ta'sirini baholash muhim ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi. Chodak ma'dan maydoni hududi gidrogeologik rayonlashtirish bo'yicha gidrogeologik massivlar Chotqol-Qurama guruhiga kiradi. Uni tashkil etgan intruziv va effuziv-cho'kindi tog' jinslar kompleksi u yoki bu darajada suvli bo'ladi. Ish olib borilayotgan hududning gidrogeologik sharoitlari asosan ikkita asosiy omil bilan belgilanadi: yer osti suvlarining joylashish sharoitlari va dinamikasini belgilovchi geologik-

tuzilmaviy xususiyatlar hamda gidrogeologik jarayonlarning jadalligidir. Gidrogeologik massivlar asosan yoriq tipidagi bosimsiz suvlarning rivojlanishi bilan tavsiflanadi. Tog' jinslarning suvliligi ekzogen va tektonik yoriqlilik bilan bog'liq bo'lib, bu tufayli yer osti suvlarining harakati sodir bo'ladi va ularning to'yinishi asosan atmosfera yog'inlarining infiltratsiyasi hisobiga amalga oshiriladi [1].

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Yer osti kon lahimlarining suvga to'yinishi, ularning turg'unligi hamda massivning fizik-mexanik xossalari o'zgarishi masalalari ko'plab olimlar ya'ni V.V. Zrodnikov va A.M. Galperinlar tomonidan o'rganib kelingan [1-2]. Tektonik buzilishlar zonalarida geologik-mineralogik omillar (ma'danlashuv va boshqalar) ta'sirida mineralashuvining kimyoviy tarkibi turlicha bo'lgan yer osti suvlari uchraydi.

Biz o'rganigan hudud maydonida quyidagi suvli komplekslar ajratib ko'rsatiladi: Zamonaviy va yuqori to'rtlamchi davr allyuvial-prolyuvial yotqiziqlarining suvli kompleksi Chodak daryosi vodiylari va uning eng yirik irmoqlari hosilalariga to'g'ri keladi. Suv sig'iruvchi yotqiziqlar qumshag'al to'ldirgichli shag'al toshlardir. Chodak daryosi yotqiziqlarida doimiy, irmoqlar yotqiziqlarida esa vaqtinchalik suvli gorizont shakllanadi.

Chodak daryosi yotqiziqlarining qalinligi 30-40 m ga yetadi, o'rganilayotgan hududda -0,5-5,0 m dan oshmaydi. Yotqiziqlarning sersuvligi kon chegarasidan tashqarida joylashgan buloqlarning 0,6 dan 4,5 l/s gacha bo'lgan sarfi bilan tavsiflanadi. Sizot suvlari sathining yotish chuqurligi 0,0 dan 5,0 m gacha o'zgaradi. Kimyoviy tarkibi bo'yicha sizot suvlari gidrokarbonatli kalsiy-natriyli. Mineralizatsiyasi 0,2 g/l dan oshmaydi, umumiy qattiqligi 3 mg-ekv/l. Buloq oqimi rejimida maksimal sarf mart oyida, minimal sarf esa noyabr-dan fevralgacha kuzatiladi. Sarflarning tebranish amplitudasi 0,5-0,8l/s ga yetadi.

Sizot suvlarining to'yinishi atmosfera yog'inlarining infiltratsiyasi, paleozoy jinslarining yoriq suvlarini drenajlash va yer usti oqimining infiltratsiyasi hisobiga amalga oshadi. Paleozoy yoriq jinslarining suvli majmuasi o'rganilayotgan hududning asosiy maydonini egallaydi va ikkita suvli zona bilan ifodalanadi:

1. Effuziv-cho'kindi jinslarning (permikarbon) ochiq darzli suvli zonasi.

2. Intruziv jinslarning ochiq darzli suvli zonasi (trias va perm).

Paleozoy jinslarining sersuvligi ularning darz ketganligidan kelib chiqadi. Kon maydonida tektonik, nurash yoriqlari rivojlangan bo'lib, aksariyat yoriqlarning kengligi 0,1 dan 3 sm gacha, tik tushuvchi yoriqlar 40° dan 70° gacha, shimoli-g'arbiy yo'nalishda joylashgan. Suvli zonalarining qalinligi turli uchastkalarda turlicha bo'lib, tog' jinslarning darzlanish darajasi va massivning chuqurlik bo'yicha tektonik buzilishining o'zgarish xarakteriga bog'liq. Darzlik suvlari sathining joylashish chuqurligi buzilmagan rejim sharoitida, asosan, yer yuzasining relyefiga bog'liq bo'ladi. Suvayirg'ichlarda yoriq suvlari sathi 80-150 m ga yetadi, yonbag'irlar bo'ylab pastga tomon yer yuzasiga yaqinlashadi. Relyefning eng past joylarida yoriq suvlari har xil debitli pastga tushuvchi buloqlar ko'rinishida ajralib chiqadi.

Pirmirob koni alohida uchastkalarda (Markaziy, Janubiy Pirmirob, Sharqiy, Oqtosh va boshqalar) +1409 m gorizontdan (dona№15) +1082 m gorizontgacha (dona№54) shtolnya usulida qavatma-qavat razvedka qilingan va qazib olingan. Kon uchastkalarida kon lahimlarini ilgari o'tkazilgan gidrogeologik va muhandislik-geologik tekshirish materiallarini tahlil qilib, kon lahimlarining suvlanganlik xarakteri bir xil ekanligini ta'kidlash mumkin. Bu turli darajadagi namlanish, tomchilar, sizib chiqishlar, kamdan-kam uchraydigan oqimsimon oqishlardir [3-4]. Shtolnya gorizontlarining suvlanganlik darajasi turlicha bo'lib, u vaqt bo'yicha ham, tog' lahimlarining massivni ochish chuqurligi bo'yicha ham o'zgarib turadi. Tekshirishlarning ko'rsatishicha, kon lahimlarining suvlanganligi, asosan, ularning uzunligiga, shuningdek, tog' jinslari massivdagi fazoviy joylashuviga bog'liq. 2020-2024-yillar davomida G'arbiy va Janubiy Pirmirob uchastkalarida gidrogeologik ishlar olib borildi. G'arbiy Pirmirob uchastkasida shtolnya bo'yicha №70 (+1125,06m) o'tkazilgan gidrogeologik tadqiqotlar natijalariga ko'ra, o'rganilayotgan gorizont asosan kam suvlangan bo'lib, ba'zi namlanishlar, kamdan-kam tomchilar, asosan yoriqlar va kuchli yoriqlar zonalar bo'ylab, burg'ilangan geologik-razvedka quduqlaridan 0,08

dan 0,2 l/s gacha bo'lgan ozgina suv sarflari bilan kam uchraydigan oqim suv namoyonlari qayd etilgan. Effuziv-cho'kindi va intruziv jinslarning ochiq yoriqli zonalaridagi yer osti suvlari kimyoviy tarkibi bo'yicha asosan gidrokarbonat-sulfatli kalsiy-magniyli bo'lib, mineralizatsiyasi 0,39-0,45 g/l ni tashkil etadi. Umumiy qattiqligi 5,10-5,4 mg-ekv/l. Sulfatga chidamli sementli betonga nisbatan agressiv emas (1-jadval) [1-4].

1-jadval

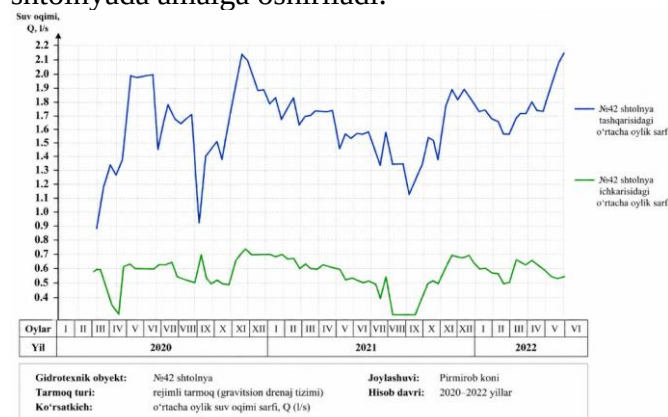
Suv yuzasining kimyoviy tarkibi

№	Kimyoviy elementlar	Bir. o'lch.	GOST bo'yicha me'yor	Chodak daryosi bo'yicha haqiqiy miqdor
1.	2.	3.	4.	5.
1.	Quruq qoldiq	mg/l.	1000	86
2.	Vodorod ionlari konsentratsiyasi	pH	6,5-9,5	7,3
3.	Umumiy bikrlilik	mg-ekv/l	7,0	3,0
4.	Xloridlar	mg/l	350	4,6
5.	Sulfatlar	-	500	17
6.	Temir	-	0,3	-
7.	Marganes	-	0,1	-
8.	Mis	-	1,0	0,002
9.	Rux	-	5,0	0,0035
10.	Alyuminiy	-	0,5	0,004
11.	Berilliy	-	0,0002	-
12.	Molibden	-	0,5	0,004
13.	Mishyak	-	0,05	-
14.	Nitratlar	-	10,0	6.
15.	Qo'rg'oshin	-	0,1	0,0003
16.	Selen	-	0,01	0,0013
17.	Stronsiy	-	2,0	0,05
18.	Ftor	-	0,7	-
19.	Uran	-	$1,7 \cdot 10^{-3}$	0,0022
20.	Radiy 226	km/l	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$2,5 \cdot 10^{-12}$
21.	Ammiak	mg/l	10	0,7

Paleozoy yoriq suvlarining mintaqaviy oqimi Qurama tizmasi yonbag'irlarining janubi-sharqiy umumiy nishabligiga muvofiq Sirdaryo daryosi tomon yo'nalgan. Mintaqaviy oqim mahalliy eroziya bazisidan pastda, ya'ni Chodak daryosi o'zanidan o'tadi. Kimyoviy tarkibiga ko'ra yoriq suvlari asosan gidrokarbonatli va gidrokarbonat-sulfatli, kamroq sulfat-karbonatli, sulfatli. Ularning minerallashuvi 0,3-0,4 g/l. Paleozoy yoriq suvlarining to'yinishi atmosfera yog'inlari va gipsometrik jihatdan yuqorida joylashgan paleozoy jinslarining ochiq yoriqli zonalarining suvli komplekslari tomonidan yer osti suv oqimi hisobiga amalga oshiriladi [5]. Kon maydonida asosan tektonik yoriqlar rivojlangan bo'lib, ular tog' jinslarining suvliligini belgilaydi. Litogen va nurash yoriqlari yer osti suvlarining akkumulyatsiyasi va sirkulyatsiyasi yo'li sifatida ahamiyatsiz rol o'ynaydi [7-8]. Konning turli qismlaridagi suvli zonalarining qalinligi turlicha bo'lib, tog' jinslarning

yoriqlilik darajasi va chuqurlikdagi massivning tektonik buzilishining o'zgarish xarakteriga bog'liq. Buzilmagan rejim sharoitida yer osti suvlari sathining yotish chuqurligi asosan yer yuzasining relyefiga va uning mahalliy eroziya bazisi (Chodak daryosi) dan nisbatan balandligiga bog'liq. Yer osti suvlari sathi 120 m chuqurlikda va undan pastda, yonbag'irlar bo'ylab pastga, Chodak daryosi o'zanida kunlik yuzaga yaqinlashadi. Eng past joylarda yer osti suvlari turli debitli pastga tushuvchi buloqlar ko'rinishida sizib chiqishi mumkin edi [4-5].

Natijalar. Chadak daryosi yuza oqimining sezilarli darajada sarflanishi sababli, keyinchalik suvga bo'lgan ehtiyoj oshgan taqdirda, boshqa manbalarni qidirmasdan turib, daryodan suv olish ehtiyojini oshirish zarur. Ayrim kon lahimlarini texnik suv bilan ta'minlashni shtolnya suvlaridan to'plagich orqali qayta foydalanishni tashkil etish yo'li bilan amalga oshirish mumkin, bu № 42 shtolnyada amalga oshiriladi.



1-rasm. №42 shtolnyadagi rejim tarmog'ining o'rtacha oylik sarflari grafigi.

Muhokama. Qoyali yoki yarim qoyali yoriqli tog' jinslarga tegishli konlar uchun tabiiy o'xshashlik usuli suv oqimlarini baholashning eng qo'llaniladigan usullaridan biridir. Texnik-iqtisodiy asoslarga ko'ra, G'arbiy va Sharqiy Pirmirob uchastkalarini qazish ishlari yer osti usulida, G'arbiy Pirmirob uchastkasida +1125,06 metr mutlaq balandlikkacha va Janubiy Pirmirob uchastkasida +830 metr mutlaq balandlikkacha amalga oshiriladi. Chodak ma'danli maydonining G'arbiy Pirmirob uchastkasining suvlanganlik manbalari faqat atmosfera yog'inlari hisoblanadi. Yer usti oqimi va yoriq suvlari o'rganilayotgan uchastkaning suvlanishiga ta'sir ko'rsatmaydi,

chunki Chodak daryosi va yer osti suvlari sathi uchastkaning qazib olish darajasidan pastda joylashgan.

Kamenskiy formulasi bo'yicha yillik o'rtacha suvlilik uchun atmosfera yog'inlari hisobiga suv oqimi quyidagicha bo'ladi:

$$Q = \frac{F \cdot N \cdot A}{365}, \quad (1)$$

bu yerda: F - suv yig'ish maydoni, m^2 . N - yog'in miqdori, m . A - infiltratsiya koeffitsiyenti.

$$Q = \frac{1000000 \cdot 0.20 \cdot 0.1}{365} = 55 \frac{m^3}{sut} = 0.61 l/s \quad (2)$$

Ko'p suvli yil sharoitida suv oqimi quyidagicha bo'ladi:

$$Q = \frac{1000000 \cdot 0.31 \cdot 0.1}{365} = 85 \frac{m^3}{sut} = 1.01 l/s \quad (3)$$

Hisob-kitoblarga ko'ra, tabiiy yomg'irlari hisobiga suv oqimi sezilarli emas va hududni suv bosish xavfini tug'dirmaydi. Atmosferada tabiiy yomg'irlarning kamligi, bug'lanishning yuqoriligi, doimiy yer usti oqimi va yoriq suvlari hisobiga suv oqimlarining yo'qligini hisobga olgan holda, uni qazib olishning gidrogeologik sharoitlarini qulay deb hisoblash mumkin. G'arbiy Pirmirob uchastkasini qazib olishning gidrogeologik sharoitlarining murakkablik darajasiga ko'ra oddiy uchastkalar qatoriga kiritish mumkin.

Chodak ma'danli maydonining Janubiy Pirmirob uchastkasining suvlanish manbalari, asosan, paleozoy darzlik suvlari bo'ladi. Kon lahimlariga yoriq suvlari hisobiga suv oqimlarini bashorat qilish tasniflash belgilari asosida ketma-ket yaqinlashish tamoyili bo'yicha amalga oshirildi. Tog' jinslarning umumlashtirilgan litologik-petrografik xususiyatlariga asoslangan geologik belgilarning mavjud gidrogeologik tasniflariga ko'ra, o'rganilayotgan hududlarda qoyali jinslar ustunlik qiladi; bu konlar oddiy gidrogeologik sharoitlari va past suvlanish darajasi bilan tavsiflanadi.

Tajriba-filtratsiya ishlari asosida va umumiy qabul qilingan tushunchalarga muvofiq, O'zbekistonning tog'li ma'danli hududlaridagi qoyali tog' jinslar mintaqaviy jihatdan yetarlicha ishonchli suv o'tkazmaydigan jinslar sifatida tasniflanadi, chunki bu tog' jinslarning filtratsiya koeffitsiyentlari tasniflash chegarasidan 1m/sutka dan oshmaydi. Biroq, ular uchun yer osti suvlarining turli joylashuvi xos bo'lib, bu turli suv oqimlarini keltirib chiqaradi. "Suvli gorizont"ning ochilgan

qalinligi hal qiluvchi omil hisoblanadi. Qazish maydoni va boshqa omillar hisob-kitoblar aniqligidan chetga chiqmaydi. Solishtirma suv oqimi (10 metrga teng bo'lgan suvli qatlam qalinligiga keltirilgan) 10 metrda 1-1,5 l/s ni tashkil etadi.

O'rganilayotgan uchastkalar barcha gidrogeologik parametrlarga ko'ra tasniflangan qiymatlar chegarasidan chiqmaydi, ya'ni 1 m/sutkadan oshmaydi, solishtirma suv oqimi gorizontning 10 m qalinligiga 1,0 l/s ni tashkil etadi. Ushbu guruhdagi konlardan foydalanish shuni ko'rsatadiki, bu yerda haqiqiy suv oqimlarining tebranishi 30 dan 500 m/soatgacha bo'lib, bu maxsus chora-tadbirlarni talab qilmaydi va kon lahimlarini suv bosishiga qarshi kurashish unumdorligi katta bo'lmagan suv chiqarish qurilmasi bilan tegishli sig'imli suv yig'gichlarni tashkil etishdan iborat. Tadqiq etilayotgan maydon sharoitida qazish chuqurligi mutlaq +830 metrgacha va yoriq suvlari sathidan 290 metr pastda bo'lganda, solishtirma suv oqimi 1,0 l/s.m ga teng bo'lib, prognoz qilingan suv oqimi quyidagicha bo'ladi:

$$Q = \frac{N \cdot q}{10} = \frac{290 \cdot 1,0}{10} = 29 l/s \quad (4)$$

Shunday qilib, O'zbekiston konlaridagi ko'p yillik kuzatuvlar tajribasi muhandislik maqsadlari uchun yetarli aniqlik bilan tadqiqot maydonini qazib olishda yoriq suvlari hisobiga yuzaga kelishi mumkin bo'lgan suv oqimi 30 l/s dan oshmasligini aniqlash imkonini beradi.

Xulosa. Kon lahimlarining suvlanganligi va uning yer osti inshootlari turg'unligiga ta'sirini o'rganish konchilik korxonalarining xavfsiz va uzluksiz ishlashini ta'minlashdagi eng muhim ilmiy-amaliy vazifalardan biridir. Olib borilgan tahlillar va o'rganishlar natijasida quyidagi xulosalarga kelindi:

- Tog' jinslarining suvga to'yinishi ularning fizik-mexanik xossalarini, xususan, bir o'qli siqilishga bo'lgan mustahkamlik chegarasini keskin pasaytiradi, g'ovaklik bosimini oshiradi va lahim devorlarining plastik deformatsiyaga uchrashiga sabab bo'ladi.

- Gilli minerallarga boy bo'lgan jinslar (argillitlar, alevrolitlar) namlanganda shishish va yumshash xususiyatiga ega bo'lib, bu holat kon lahimlari mustahkamlagichlariga tushadigan kon bosimining bir necha barobar ortishiga va

favqulodda avariya holatlarining kelib chiqishiga olib keladi.

- Lahim atrofi massividagi suvlanish zonalarini o'z vaqtida aniqlash uchun kompleks yondashuv – ya'ni vizual kuzatuvlar, laboratoriya sinovlari hamda zamonaviy geofizik usullarni uyg'un holda qo'shib olib borish yuqori natija beradi.

- Suvlanishning salbiy ta'sirini kamaytirish va kon lahimlarining uzoq muddatli turg'unligini

ta'minlash maqsadida drenaj tizimlarini to'g'ri loyihalashtirish, in'eksiya ishlarini bajarish hamda namlikka chidamli zamonaviy mustahkamlash (torkret-beton va ankerli mustahkamlash) turlaridan foydalanish maqsadga muvofiqdir.

Tadqiqot davomida aniqlangan qonuniyatlar va ishlab chiqilgan tavsiyalar kon lahimlarini loyihalash hamda ulardan foydalanish jarayonida yuzaga keladigan gidrogeologik xavflarni oldindan baholash va ularning oldini olish imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Егоров, П. В., & Егоров, О. П. (n.d.). Влияние нарушенности и обводненности горных пород на устойчивость горных выработок. Физические процессы горного производства. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-narushennosti-i-obvodnennosti-gornyh-porod-na-ustoychivost-gornyh-vyrabotok/viewer>
- [2] Суимбаева, А. М., Имашев, А. Ж., Жунусбекова, Г. Ж., & Мусин, А. А. (2025). Оценка устойчивости горных выработок в зонах влияния отработанных пространств. Горный журнал Казахстана, (10). <https://doi.org/10.48498/minmag.2025.246.10.010>
- [3] Булычев, Н. С. (1994). Механика подземных сооружений. Москва: Недра.
- [4] G'aniyev, Q. G., & Hojiboyev, M. A. (2002). Muhandislik geologiyasi va gidrogeologiya asoslari. Toshkent: O'qituvchi.
- [5] Зродников, В. В., & Галперин, А. М. (2005). Гидрогеомеханика подземных сооружений. Москва: Горная промышленность.
- [6] O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi. (2021). Ilmiy nashrlarni tayyorlash va chop etish tartibi to'g'risidagi nizom. <https://lex.uz>
- [7] International Organization for Standardization. (2018). ISO 690:2010 Information and documentation — Guidelines for bibliographic references and citations to information resources. ISO.
- [8] Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2006). Rock mechanics for underground mining (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2116-9>
- [9] Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). Introductory mining engineering (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Toshtemirov, U. T., Qosimov, M. O., Yormatov, O. Sh., & Bo'riyev, F. M. (2026). Kon lahimlarining suvlanganligini aniqlash va uning turg'unligiga ta'sirini baholash. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.34>

UO‘K: 669.21/.23:622.7

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.33

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

KLINKERDAN KUMUSH VA MISNI AJRATIB OLISH TEXNOLOGIYASINI TADQIQ QILISH



Qayumov Oybek Azamat
o‘g‘li

Qarshi davlat texnika universiteti
dotsenti, Qarshi, O‘zbekiston
E-mail: oybekqayumov@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-4620-6429
Science ID: FQD-0225-0028



Uzoqov Shaxrizod
Zafarjon o‘g‘li

Qarshi davlat texnika universiteti,
Qarshi, O‘zbekiston
E-mail:
uzoqovshaxrizod73@gmail.com
ORCID ID: 0009-0006-4886-1290
Science ID: MQD-0426-0008



Larionov Sergey
Vladimirovich

“Olmaliq kon-metallurgiya
kombinati” AJ bosh muhandisi,
Olmaliq, O‘zbekiston
E-mail: s.larionov@aqmk.uz
ORCID ID: 0009-0007-0681-6552
Science ID: MTV-0926-0058

Annotatsiya. Foydali qazilmalardan foydalanish va rangli metallar ishlab chiqarishga bo‘lgan talab yildan-yilga ortib bormoqda. Shu sababli, metallurgiya sanoatida ko‘p miqdorda texnogen chiqindilar hosil bo‘lmoqda. Bu chiqindilar chiqindixonalarda to‘planib, atrof-muhitga salbiy ta‘sir ko‘rsatmoqda va foydali yer maydonlarini egallamoqda.

Shu texnogen chiqindilardan biri – rux ishlab chiqarish chiqindisi klinker bo‘lib, tarkibida ko‘plab qimmatbaho komponentlar (rux, mis, temir, oltin, kumush va boshq.) ni jamlab olgan. Klinkerni qayta ishlash uchun olib borilgan ko‘plab ilmiy tadqiqotlar hali ham ishlab chiqarishga joriy qilinmaganligi, joriy qilingani esa komponentlarni to‘liq ajratib olish imkonini bermaganligi sababli klinkerni qayta ishlash muammosi hali ham dolzarb bo‘lib qolmoqda.

Ushbu maqolada “Olmaliq KMK” AJ rux zavodi chiqindisi klinkerdan kumushni va misni ajratib olish texnologiyasi keltirilgan.

Kalit so‘zlar: rux, klinker, oltin, mis, texnogen chiqindi, mineralogik tarkib, qayta ishlash.

Received: 05.09.2026

Accepted: 15.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЕРЕБРА И МЕДИ ИЗ КЛИНКЕРА

Каюмов Ойбек Азамат
угли

Доцент Каршинского
государственного технического
университета, Карши,
Узбекистан

Узоков Шахризод
Зафаржон угли

Каршинский государственный
технический университет,
Карши, Узбекистан

Ларионов Сергей
Владимирович

Главный инженер АО
«Алмалыкский горно-
металлургический комбинат»,
Алмалык, Узбекистан

Аннотация. Потребность в использовании полезных ископаемых и производстве цветных металлов из года в год возрастает. Вследствие этого в металлургической промышленности образуется значительное количество техногенных отходов. Эти отходы складываются на полигонах, оказывая негативное воздействие на окружающую среду и занимая ценные земельные площади.

Одним из таких техногенных отходов является клинкер — отход цинкового производства, содержащий множество ценных компонентов, включая цинк, медь, железо, золото, серебро и др. Проблема переработки клинкера остается актуальной, поскольку многочисленные научные разработки в этой области до сих пор не внедрены в производство, а существующие технологии не обеспечивают полного извлечения содержащихся в нем компонентов.

В данной статье представлена технология извлечения серебра и меди из клинкера, являющегося отходом цинкового завода АО «Алмалыкский ГМК».

Ключевые слова: цинк, клинкер, золото, медь, техногенные отходы, минералогический состав, переработка.

A STUDY OF TECHNOLOGY FOR THE EXTRACTION OF SILVER AND COPPER FROM CLINKER

**Kayumov Oybek Azamat
ugli**

Associate Professor, Karshi State
Technical University, Karshi,
Uzbekistan

**Uzokov Shakhruzod
Zafarjon ugli**

Karshi State Technical University,
Karshi, Uzbekistan

**Larionov Sergey
Vladimirovich**

Chief Engineer, JSC "Almalyk
Mining and Metallurgical
Complex", Almalyk, Uzbekistan

Abstract. The demand for mineral resources and the production of non-ferrous metals is growing year by year. Consequently, the metallurgical industry generates a large amount of industrial waste. This waste accumulates in landfills, negatively impacting the environment and occupying valuable land.

One such type of industrial waste is clinker, a byproduct of zinc production that contains many valuable components (zinc, copper, iron, gold, silver, etc.). The problem of processing clinker remains a pressing issue, as numerous scientific studies on its processing have not yet been implemented in production, and those that have been do not allow for the complete extraction of its components.

This article presents a technology for extracting silver and copper from clinker, a waste product of the zinc plant at Almalyk Mining and Metallurgical Company JSC.

Keywords: zinc, clinker, gold, copper, industrial waste, mineralogical composition, processing.

Kirish. Dunyoda kimyo-metallurgiya sanoatining jadal rivojlanishi natijasida rudalarni qayta ishlash va metall olish texnologiyalari takomillashib borayotgan bo'lsa-da, ruda tarkibidagi barcha foydali komponentlarni to'liq ajratib olish masalasi hanuzgacha dolzarb bo'lib qolmoqda. Shular jumlasiga rux sanoati chiqindisi bo'lgan klinker hisoblanadi. Klinker tarkibida rux hamda misdan tashqari bir qancha qimmatbaho komponentlar — oltin, kumush, kadmiy, temir, qo'rg'oshin kabi komponentlar mavjud [1].

Klinkerni qayta ishlash jarayoni nafaqat resurslardan oqilona foydalanish va iqtisodiy jihatdan samaradorlikka erishish, balki atrof-muhitni muhofaza qilish nuqtai nazaridan ham muhim ahamiyatga ega. Ushbu jarayon orqali rangli metallurgiya xomashyo bazasini ma'lum darajada kengaytirish, xomashyoga ehtiyoj seziyotgan boyitish korxonalarini qo'shimcha material bilan ta'minlash hamda tabiiy rudalarni qazib olish bilan bog'liq xarajatlarni kamaytirish mumkin.

Bundan tashqari, klinkerlar to'plangan hududlarni qayta ishlash orqali ekologik vaziyatni yaxshilash va xo'jalik faoliyati uchun yaroqli yer maydonlarini qayta foydalanishga kiritish imkoniyati yaratiladi.



1-rasm. Rux zavodi chiqindisi klinker maydoni.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. “Olmaliq KMK” AJ rux zavodi chiqindisi — klinkerning texnologik xususiyatlarini har tomonlama oʻrganish va uni qayta ishlash texnologiyasini ishlab chiqish maqsadida kompleks tadqiqot usullaridan foydalanildi. Ushbu usullar quyidagilarni oʻz ichiga oladi: ilmiy-texnik maʼlumotlarni tahlil qilish va umumlashtirish, analitik tadqiqotlar hamda laboratoriya sharoitida tajribalar oʻtkazish. Tajribalar granulometrik va mikroskopik (“Mineral S-7” tasvir tahlilchisi), elektron mikroskopik (JEOL JSM-IT200) tahlillarni, qattiqlikni aniqlashni (Buehler Micromet 5103 mikrokattiqlik oʻlchagichi) hamda pH-metriyani oʻz ichiga oldi. Shuningdek, klinker fazalarini magnit, gravitatsion va flotatsion boyitish usullari yordamida ajratish qonuniyatlarini aniqlash maqsadida laboratoriya tajribalari oʻtkazildi. Tajribalar davomida zamonaviy va amaliyotda sinovdan oʻtgan tadqiqot usullari majmuasidan foydalanildi [2].

Klinker tuzilishini optik-mikroskopik oʻrganish Oʻzbekiston–Yaponiya yoshlar innovatsiya markazida hamda “Olmaliq KMK” AJ Markaziy laboratoriyasida amalga oshirildi.

“Olmaliq KMK” AJ Rux zavodida velslash klinkerining kimyoviy tarkibi oʻtkazilgan tahlillar asosida aniqlandi. Uning asosiy komponentlari va miqdoriy koʻrsatkichlari 1-jadvalda keltirilgan. Ushbu maʼlumotlar klinkerni keyingi texnologik qayta ishlash hamda qimmatbaho komponentlarni ajratib olish imkoniyatlarini baholash uchun dastlabki asos boʻlib xizmat qiladi.

1-jadval

“Olmaliq KMK” AJ Rux zavodi klinkerining kimyoviy tarkibi

Element, birikma nomi	Cu	Pb	Zn	Fe _{um}	S _{um}	C	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Tarkibi	2,71	1,49	1,47	30,16	11,6	24,2	5,91	5,01	15,1
Element, birikma nomi	MgO	Cd	As	TiO ₂	H ₂ O	Mn ₂ O ₃	Ba	Au	Ag
Tarkibi	2,4	<0,01	0,12	0,16	1,27	0,6	1,8	2,81 g/t	228,6 g/t

Kimyoviy tahlil natijalariga koʻra klinker quyidagi tarkibga ega (%): 2,71 Cu, 1,49 Pb, 1,47 Zn, 0,01 Cd, 30,16 Fe, 0,12 As, 11,6 S_{um}, 24,2 C, 1,8 Ba, 1,27 H₂O, 15,1 SiO₂, 5,91 CaO, 2,4 MgO, 5,01 Al₂O₃, 0,6 Mn₂O₃, 0,16 TiO₂, shuningdek 2,81 g/t Au, 228,6 g/t Ag.

Klinkerning kimyoviy tahlil natijalaridan xulosa qiladigan boʻlsak klinkerdagi qimmatbaho komponentlar Cu, Zn, Pb, Au, Ag, Fe hisoblanadi [3].

2-jadval

Rux ishlab chiqarish klinkerining mineralogik tarkibi

№	Mineralogik tarkibi	Miqdori, %
1	Shisha-fayalit	35
2	Pirrotrin, FeS	2.1
3	Mis sulfidlari (Bornit Cu ₅ FeS ₄ , xalkozin Cu ₂ S, xalkopirit CuFeS ₂)	4
4	Magnetit Fe ₃ O ₄	1,3
5	Limonit 2Fe ₂ O ₃ ·3H ₂ O	4-5
6	Metallik temir Fe	16.5
7	Rux ferritlari ZnO Fe ₂ O ₄ (shpinel tuzilishiga ega qoʻsh oksid), rux silikatlari Zn ₂ SiO ₄	4
8	Mis ferratlari CuFeO ₂	0.1
9	Metallik mis Cu	0.01
10	Koʻmir (koks)	27.6

Mineral tarkibiga koʻra klinkerning asosiy qismini shisha fayalit (35%), koʻmir (koks) (27,6%) va metallik temir (16,5%) tashkil etadi. Mis tarkibli minerallar jami 4.1%ni jumladan: bornit, xalkozin, xalkopirit 4,0% ni va mis ferritlari 0.1 fozini tashkil qiladi. Metal mis 0,01% miqdorda mavjud. Klinker tarkibidagi temir asosan quyidagi minerallarda uchraydi: metallik temir (16,5%), pirrotrin (2,1%) va magnetit (1,3%).

Kimyoviy mineralogik tarkiblarni oʻrganish tahlillari va natijalaridan xulosa qiladigan boʻlsak klinker tarkibidagi qimmatbaho komponentlar (kumush, mis)ni ajratish uchun dastlab tarkibidan uglerodni va temirni ajratib olish zaruratini tugʻdiradi.

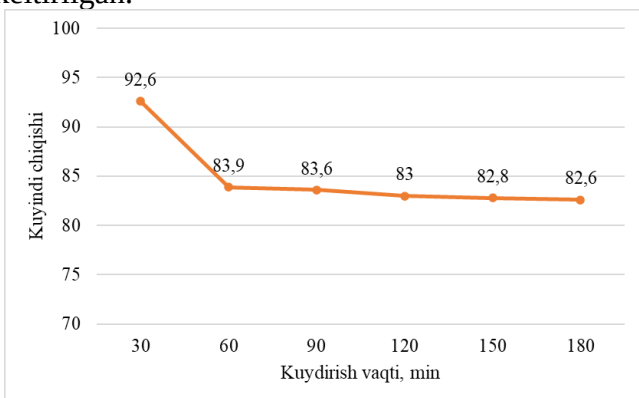
Klinker tarkibidan ushbu qimmatbaho komponentlarni toʻgʻridan-toʻgʻri boyitish va qayta ishlash samara bermaganligi hamda tarkibida uglerod miqdorining yuqoriligi sababli, dastlab uglerod miqdorini kamaytirish va qimmatbaho metallarni erkin zarralar koʻrinishiga oʻtkazish uchun tajribalar olib bordik.

Metallurgiya va qayta ishlashga tushadigan mahsulotdagi organik uglerodning salbiy taʼsirini kamaytirish uchun qoʻllaniladigan maʼlum usullarga: dastlabki koʻmir flotatsiyasi bosqichida xomashyodan uglerodni reagentlar - kerosin, butil spirti va boshqalar yordamida chiqarib tashlash, Gravitatsion va flotatsion usullarning kombi-natsiyasi, Organik uglerod depressorlari vazifasini bajaruvchi reagentlarni qoʻllagan holda flotatsiya jarayonida organik uglerodni bostirish, Ishqorlash boʻtanasi yuqori sorbsion faollikka ega boʻlgan sorbentni kiritish orqali sorbsion sianlash, Sorbsion sianlashdan oldin boʻtanani xlorlash, 550-800 °C haroratda oksidlab kuydirish kiradi. Ushbu

usullardan eng yaxshi natija bergani kuydirish jarayoni bo'ldi. Yuqori haroratda kuydirish uglerodni yo'qotish va metallarni erkin holatga o'tkazish maqsadida foydalanildi. Jarayonga Natriy karbonat qo'shib mikroto'q'inli pechga kuydirildi.

Namunani mikroto'q'inli kuydirish kinetikasi natijalari. Texnik tarozida massasi 100 g bo'lgan klinker namunasi olindi va 5 gramm Na_2CO_3 qo'shib shixta tayyorlandi. Shundan so'ng uni kuydirish uchun mikroto'q'inli pechga qo'yildi. Kuydirish jarayoni 700 Vt quvvatda 450–650 °C harorat oralig'ida, 30–180 daqiqalik vaqt intervallarida tadqiq qilindi [7–8].

Mikroto'q'inli ishlov berish jarayonida uglerod miqdorining o'zgarishi 2-rasmda keltirilgan.



2-rasm. Klinkerni kuydirishning vaqtga bog'liqlik grafifi.

Namunani 30 daqiqa davomida mikroto'q'inli ishlov berishda organik uglerodning taxminan 41 foizi ajraldi, kuydirish davomiyligi 60 daqiqa bo'lganda esa uglerodni ajralish darajasi taxminan 91,8 foizni tashkil etdi.

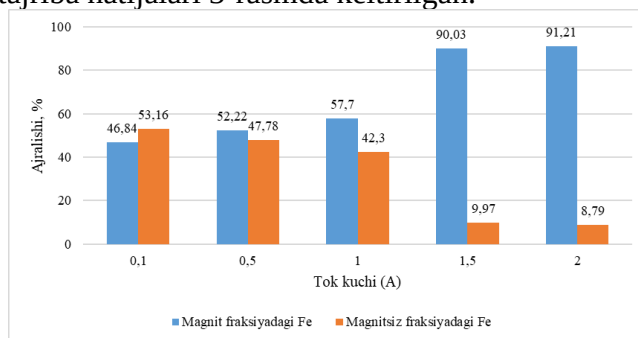
Kuydirish natijasida olingan kuyindining kimyoviy tahlil natijalari tarkibidagi oltingugurt va organik uglerodning mos ravishda 96% va 99% miqdorda kamayganini ko'rsatdi. Mikroto'q'inli kuydirish natijasida qimmatbaho metallarning yuzasi ochilganligi hamda oksid holatga o'tganligini ko'rishimiz mumkin.

Uglerodsizlangan klinkerdan temirni magnit usulda boyitish. Klinkerning fazaviy va elak tahlili ko'rib chiqilganda fazaviy tahlil klinkerdagi ruxning asosiy shakllari quyidagilardan iboratligini ko'rsatdi: sulfid (45%), silikat (17%), ferrit (20%) va oksid (18%); klinkerdagi qo'rg'oshin quyidagi shakllarda mavjud: metall

(40%), sulfid (29%), alyuminat (25%), oksid va silikat (6%); mis asosan sulfid (bornit) shaklida ifodalangan. Misning metallanish darajasi 22–32% ni tashkil etadi. Klinkerdagi temir sulfid shaklida mavjud bo'lsa-da, uning asosiy shakli metall temir hisoblanadi. Temirning metallanish darajasi 80–90% ga teng. Klinkerni mikroto'q'inli kuydirishdan so'ng temirni magnit usulda ajratib olish natijalari yaxshi ko'rsatkichlarni berdi [8].

Klinkerining magnit separatsiyasi natijalari shuni ko'rsatdiki, magnit maydon kuchlanganligi oshishi bilan magnit fraksiyaning chiqishi qonuniyatli ravishda ortadi. Temirning maksimal ajralib chiqishi o'rganilgan magnit maydon kuchlanganliklarining eng yuqorisida (1, 1.5, 2 A) kuzatiladi.

Klinkerdan temir magnit separatsiya usuli bilan ajratib olindi. Temirning ajralishi va boyitma chiqishining tok kuchiga bog'liqligi o'rganildi, tajriba natijalari 3-rasmda keltirilgan.

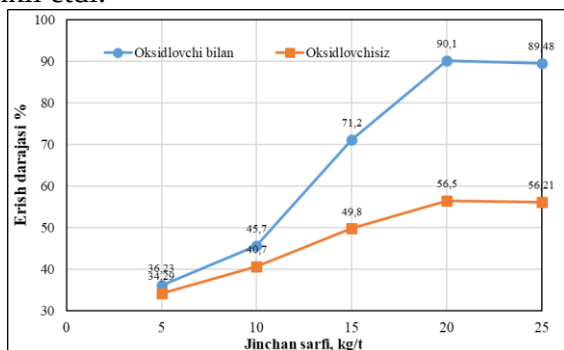


3-rasm. Temirning magnit fraksiyaga ajralish jarayonida tok kuchiga bog'liqlik grafifi.

Olingan temir boyitmasini keyingi qayta ishlash uchun iste'molga yuborish mumkin. Olingan nomagnit mahsulot kimyoviy tahlil qilindi. Natijalaridan xulosa qiladigan bo'lsak, asosiy rangli va nodir metallarning asosiy qismi magnitsiz fraksiyada saqlanib qoldi.

Nomagnit fraksiyani Jinchan yordamida tanlab eritish jarayonini tadqiq qilish. Magnitli separatsiyadan keyin tarkibida asosiy rangli va nodir metallarni saqlagan magnitsiz fraksiyani tanlab eritish bo'yicha tadqiqotlar o'tkazildi. Nomagnit fraksiyada asosiy metallardan 5.1% Cu, 2.8% Pb, 2.7% Zn, 5.13% Fe, 218,7 g/t Ag, 2.12 g/t Au va boshqa komponentlardan iborat. Nomagnit mahsulot tarkibidan kumushni tanlab eritib ajratib olish uchun Natriy sianid o'rnini bosuvchi ekologik toza, xavfsiz Jinchan reagentidan foydalanildi.

Tanlab eritishning davomiyligi, vaqt, eritma konsentratsiyasi, harorat, Q:S nisbatiga bog'liqligi o'rganildi. Jinchuan reagenti sarfi 5 kg/t dan 25 kg/t, tanlab eritish davomiyligi 0,5–2,5 soatni tashkil etdi, qattiq fazaning suyuq fazaga nisbati 1:2÷1:4 oralig'ida o'zgardi, ishqorlash harorati 25–75°C ni tashkil etdi.



4-rasm. Jinchuan reagent miqdorining kumushni eritmaga ajralish darajasiga ta'siri.

4-rasmdan ko'rinib turibdiki, kumushning eritmaga o'tishining eng yuqori ko'rsatkichi oksidlovchi ishtirokisiz 56.5 % ni, oksidlovchi H₂O₂ ishtirokida reagent sarfi 20 kg/t bo'lganda 90.1% ni tashkil qildi. Tanlab eritish jarayoniga H₂O₂ ni qo'shish bilan kumushni tanlab eritish yaxshi natijalarga erishildi.

Tanlab eritish davomiyligining kumushni eritmaga ajratib olishga ta'siri. Tajribalar quyidagi vaqt oralig'ida o'tkazildi: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 soat. Natijalar 3-jadvalda va 5-rasmda keltirilgan.

3-jadval

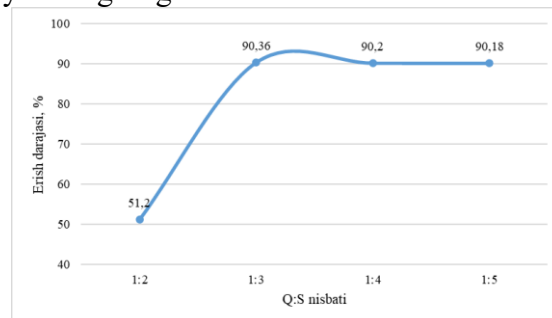
Kumushning eritmaga ajralishining tanlab eritish davomiyligiga bog'liqligi

Davomiylilik, soat	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Kumushning eritmadagi miqdori, mg/l	48,16	56,14	62,60	62,62	62,4
Kumushning eritmaga o'tish darajasi, %	68,8	80,2	89,43	89,46	89,49
Kekdagi kumush miqdori, g/t	65,52	41,58	22,2	22,13	22,07

Tanlab eritish davomiyligini 1,5 soatdan 2,5 soatgacha oshirish kumushni ajratib olish darajasiga sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi. Shu sababga ko'ra, tanlab eritishning optimal vaqti aynan 1,5 soat etib tanlandi.

Qattiq fazaning suyuq fazaga nisbatining kumushning eritmaga ajralib chiqishiga ta'siri. Ushbu tajribalar davomida Q:S nisbati 1:2÷1:5 oralig'ida o'zgartirildi (3-jadval, 5-rasm). Qolgan

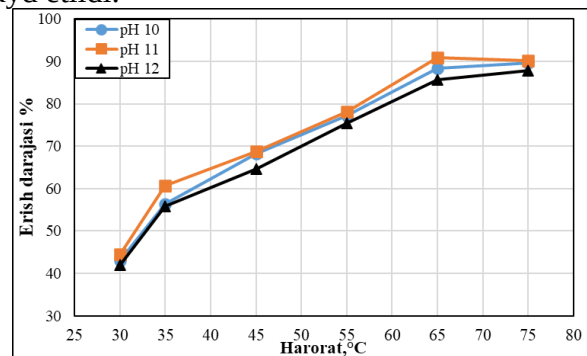
o'rganilayotgan parametrlar doimiy bo'lib, avvalgi seriyalardagilarga o'xshashdir.



5-rasm. Kumushni eritmaga ajralish darajasining Q:S nisbatiga bog'liqligi.

5-rasmdan ko'rinib turibdiki, oksidlovchi H₂O₂ ishtirokida klinkerni tanlab eritishda Q:S nisbatining 1:2 dan 1:3 gacha oshirilishi kumushning eritmaga ajralishini mos ravishda 51,2 dan 90,36 gacha oshirdi. Q:S nisbatining 1:3 dan 1:5 gacha oshirilishi esa kumushning ajralish ko'rsatkichlariga deyarli ta'sir qilmadi.

Kumushni eritmaga ajratib olishga tanlab eritish haroratining ta'siri. Haroratning kumushning eritmaga ajralish darajasiga ta'siri o'rganilganda, harorat 30°C dan 75°C gacha oshirilishi bilan barcha tadqiq qilingan pH qiymatlarida kumushning eritmaga ajralish darajasi sezilarli ravishda ortishi kuzatildi. Ayniqsa, 30–65°C oralig'ida ajralish darajasining jadal o'sishi qayd etildi.



6-rasm. Harorat va pH qiymatlarining kumushning eritmaga ajralish darajasi bilan bog'liqligi.

Muhokama. Olingan natijalar tahlili kumushning eritmaga ajralish darajasi pH qiymatiga hamda tanlab eritish haroratiga bog'liqligini ko'rsatdi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, pH=11 muhitida 65°C haroratda kumushning eritmaga ajralish darajasi 90,82% ga yetib, eng yuqori

qiymatni tashkil etdi. Shu haroratda $pH=10$ va $pH=12$ qiymatlarida mazkur ko'rsatkich mos ravishda taxminan 88% va 85% ni tashkil etdi. Bu natijalar tadqiq etilgan pH qiymatlari orasida $pH=11$ muhiti kumushning eritmaga o'tishi uchun eng qulay sharoit ekanligini ko'rsatadi.

Jinchanli tanlab eritish jarayonidan hosil bo'lgan kekdan misni ajratib olish texnologiyasini tadqiq qilish. Kek tarkibida mavjud bo'lgan rangli metallar orasida mis alohida texnologik ahamiyatga ega, chunki u sulfat kislota muhitida nisbatan samarali eritmaga o'tkazilishi mumkin. Shu sababli Jinchanli tanlab eritishdan keyingi qattiq qoldiqni H_2SO_4 eritmasi bilan gidrometallurgik qayta ishlash orqali misni selektiv ravishda eritma fazasiga o'tkazish va undan keyinchalik tovar mahsulot olish imkoniyatini aniqlash maqsadga muvofiqdir. Mazkur jarayon bir vaqtning o'zida kek tarkibida qolgan mis miqdorini

kamaytirish hamda boshlang'ich xomashyodan metallarning umumiy ajratib olish darajasini oshirish imkonini beradi.

Xulosa. Olingan ma'lumotlarni umumlashtirish natijasida, kumushni eritmaga yanada to'liqroq ajratib olish uchun tanlab eritish jarayonini $65^{\circ}C$ haroratda olib borish maqsadga muvofiq ekanligi aniqlandi. Kimyoviy oksidlovchi H_2O_2 ishtirokida klinkerni Jinchan reagenti yordamida tanlab eritishda kumushning eritmaga eng yuqori darajada ajralishi Jinchan reagenti sarfi 20 kg/t, harorat $65^{\circ}C$, $pH=11$, $Q:S=1:3$ nisbati va jarayon davomiyligi 1,5 soat bo'lganda ta'minlandi. Ushbu sharoitda kumushning eritmaga ajralish darajasi 90,82% ni tashkil etdi.

Keyingi tajribalarda kumushni eritmadan cho'ktirish va kekdan misni sulfat kislota tanlab eritish mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Каюмов, О. А. У., & Узоков, Ш. З. У. (2026). Исследование способов переработки клинкера. *Universum: Технические науки*, 5(1[142]), 44–46.
- [2] Qayumov, O. A., & Uzoqov, Sh. Z. (2025). Velslash jarayonida hosil bo'lgan klinkerni qayta ishlash usullarini ishlab chiqish uchun tadqiq qilish. *Sanoatda Raqamli Texnologiyalar / Цифровые технологии в промышленности*, 3(2), 101–104.
- [3] Toshqodirova, R., Jalolov, B., & Abdukarimova, N. (2022). "Olmaliq KMK" AJ rux zavodida rux kekini velslash jarayonini o'rganish. *Uzbek Scholar Journal*, 5, 210–214.
- [4] Созонова, Е. В. (2012). Пути разработки технологии обогащения клинкера от вельцевания цинковых кеков. In *Научные исследования в горнометаллургическом производстве: Сборник научных трудов. ВНИИЦВЕТМЕТ*.
- [5] Toshqodirova, R., Jalolov, B., & Abdukarimova, N. (2022). Rux keki va uni velslash usuli bilan qayta ishlashda hosil bo'luvchi mahsulotlar tahlili. *Uzbek Scholar Journal*, 4, 157–164. Maqola
- [6] Бочаров, В. А., & Игнаткина, В. А. (2007). О роли железа и его соединений в процессах обогащения сульфидных руд цветных и благородных металлов. *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*, (5), 4–12.
- [7] Патент на изобретение № 2356960. Способ переработки отходов цинкового производства. (2006, November 15).
- [8] Букульбаева, Н. С., Эдилканова, М. Э., & Кокаева, Г. А. (n.d.). Обзор технологий переработки клинкера вельц печей. Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Qayumov, O. A., Uzoqov, Sh. Z., & Larionov, S. V. (2026). Klinkerdan kumush va misni ajratib olish texnologiyasini tadqiq qilish. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.33>

УДК: 669.2:622.765

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.35

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ МЕДНО- ПОРФИРОВЫХ РУД



Аскарров Азгам Муратович

Начальник Управления международного сотрудничества и координации инвестиционных проектов и локализации Министерства горнодобывающей промышленности и геологии Республики Узбекистан, Алмалык, Узбекистан
E-mail: A.Askarov@mingeo.uz
ORCID ID: 0009-0001-8116-671X
Science ID: FTV-0926-0030



Мамаисакова Зебо Баходир кизи

Базовый докторант филиала НИТУ «МИСИС» в городе Алмалык, Алмалык, Узбекистан
E-mail: mamaisakovazebo@gmail.com
ORCID ID: 0009-0004-2600-092X
Science ID: FTV-0525-0103

Аннотация. В статье рассматриваются вещественный состав и технологические свойства медно-порфировых руд на примере месторождений Центральной Азии, в частности Алмалыкского региона, месторождений «Кальмакыр» и «Ёшлик». Проанализированы механизмы потерь благородных металлов — золота и серебра — как на стадии флотационного обогащения, так и при последующей пирометаллургической переработке. На основе мирового опыта обогатительных предприятий обоснована необходимость перехода от традиционных флотационных схем, обеспечивающих непрерывное извлечение ценных компонентов, к комбинированным гравитационно-флотационным и гидрометаллургическим технологиям.

Ключевые слова: медно-порфировые руды благородные металлы флотационное обогащение извлечение золота халькопирит пиритная концентрация гравитационно-флотационная технология.

Received: 07.09.2026

Accepted: 17.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

MIS-PORFIR MINERALLARINI KOMPLEKS QAYTA ISHLASH JARAYONIDA QIMMATBAHO METALLAR YO‘QOTILISHINI KAMAYTIRISHNING TEXNOLOGIK ASOSLARI

Askarov Agzam Muratovich

O‘zbekiston Respublikasi Tog‘-kon sanoati va geologiya vazirligi,
Xalqaro hamkorlik, investitsiya loyihalarini muvofiqlashtirish va
mahalliy lashtirish boshqarmasi boshlig‘i, Olmaliq, O‘zbekiston

Mamaisakova Zebo Bahodir qizi

Tayanch doktorant, Milliy texnologik tadqiqotlar universiteti
MISISning Olmaliq shahridagi filiali, Olmaliq, O‘zbekiston

Annotatsiya. Maqolada Markaziy Osiyo konlari (xususan, Olmaliq mintaqasi Qalmoqir va “Yoshlik” koni) misolida mis-porfir rudalarining moddiy tarkibi va texnologik xususiyatlari ko‘rib chiqilgan. Flotatsion boyitish bosqichida ham, keyingi pirometallurgik qayta ishlashda ham nodir metallarning (oltin va kumush) yo‘qotilish mexanizmlari tahlil qilingan. Boyitish korxonalarining jahon tajribasi asosida qimmatbaho komponentlarni uzluksiz ajratib olishni ta‘minlaydigan an‘anaviy flotatsion

sxemalardan kombinatsiyalangan gravitatsion-flotatsion va gidrometallurgik texnologiyalarga o'tish zarurligi asoslangan.

Kalit so'zlar: *mis-porfirli rudalar nodir metallar flotatsion boyitish oltin ajratib olish xalkopirit pirit konsentratsiyasi gravitatsion-flotatsion texnologiya.*

TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS OF REDUCING LOSSES OF PRECIOUS METALS DURING COMPREHENSIVE PROCESSING OF COPPER-PORPHYRY MINERALS

Askarov Agzam Muratovich

Head of the Department for International Cooperation,
Coordination of Investment Projects and Localization, Ministry of
Mining Industry and Geology of the Republic of Uzbekistan,
Almalyk, Uzbekistan

Mamaisakova Zebo Bahodir kizi

Basic Doctoral Student, Almalyk Branch of National University of
Science and Technology "MISIS", Almalyk, Uzbekistan

Abstract. *The article examines the material composition and technological characteristics of copper-porphyry ores using the Central Asian deposits—specifically, the Kalmakyr and "Yoshlik" deposits in the Almalyk region—as examples. The mechanisms of rare-metal (gold and silver) losses were analyzed both at the flotation-enrichment stage and during subsequent pyrometallurgical processing. Based on the global experience of processing enterprises, the need to transition from traditional flotation schemes, which ensure the continuous recovery of valuable components, to combined gravity-flotation and hydrometallurgical technologies has been substantiated.*

Keywords: *copper-porphyry ores noble metals flotation enrichment gold extraction chalcopyrite pyrite concentration gravity-flotation technology.*

Введение. Минерально-сырьевая база цветной металлургии в значительной степени опирается на переработку полиметаллических руд сложного вещественного состава. Среди них доминирующее положение занимают руды медно-порфирового типа, обеспечивающие более 65% мировой добычи меди и значительную долю попутного золота и молибдена. Характерной особенностью данных месторождений является штокверковый тип оруденения, огромные объемы рудных тел и относительно невысокое содержание полезных компонентов, что предопределяет необходимость переработки больших объемов горной массы [1].

В условиях Республики Узбекистан (в частности, при освоении крупного месторождения «Ёшлик I») комплексное извлечение попутных благородных металлов является приоритетной экономической и технологической задачей. Традиционные монотехнологии, ориентированные исключительно на флотационное выделение сульфидов меди, достигают своего технологического предела, оставляя существенную часть золота в отвальных продуктах [1,3-4].

Минералого-технологическая характеристика руд и формы нахождения золота. Эффективность обогащения полиметаллических медных руд, прежде всего, зависит от их минералогического состава, характера сростания минералов и характера вкрапленности ценных компонентов. В первичных рудах основными рудными минералами меди являются халькопирит (CuFeS_2) и борнит (Cu_5FeS_4), а молибден представлен молибденитом (MoS_2). Вмещающие породы преимущественно состоят из кварца и силикатов, доля которых достигает 88,5 % [2].

Руда характеризуется прожилково-вкрапленной текстурой. Рудные минералы встречаются в кварц-полевошпатовой матрице в виде гнездовых скоплений, тонких прожилков и относительно равномерной вкрапленности.

Количественный минеральный состав руды был рассчитан методом площадей и подтвержден результатами рентгенофазового анализа (РФА). Химический состав и модальный минеральный состав исследованной пробы приведены в таблицах ниже.

Таблица 1.
Химический состав технологической пробы руды

Компонент	Содержание	Метод определения	Технологическое значение
Cu	0,61 %	Йодометрия	Основной извлекаемый компонент
Mo	0,014 %	Колориметрия	Попутный компонент, требует селекции
Au	0,82 г/т	Пробирно-ААС	Критический попутный компонент
Ag	3,60 г/т	Атомно-абсорбционный	Попутный компонент
SiO ₂	62,40 %	Гравиметрия	Абразивность и твердость
Al ₂ O ₃	14,80 %	Комплексонометрия	Шламообразование
Fe	5,10 %	Титриметрия	Связано с пиритом и магнетитом
S	4,25 %	Гравиметрия	Расход коллектора и регулирование pH
CaO	1,90 %	Атомно-эмиссионный	Влияние на расход извести
As	0,003 %	Атомно-эмиссионный	Экологический фактор
Sb	<0,001 %	Атомно-эмиссионный	—

Таблица 2.
Модальный минеральный состав исследуемой пробы

Группа	Минерал	Формула	Массовая доля, %	Примечание
Сульфиды	Пирит		6,50	Основной концентрат упорного Au
	Халькопирит		1,72	Основной минерал меди (90 % Cu)
	Борнит		0,08	Вторичный минерал
	Халькозин/Ковеллин		0,05	Зона окисления
	Молибденит		0,02	Чешуйчатые агрегаты
Нерудные	Магнетит/Гематит		1,50	Оксидные фазы железа
	Кварц		45,30	Основная масса породы
	Полевые шпаты	(K,Na) AlSi ₃ O ₈	26,10	Ортоклаз, плагиоклаз
	Слюды (серицит)		12,50	Источник вторичных шламов
	Карбонаты		2,80	Доломит
	Глинистые (каолинит)		3,43	Сорбенты реагентов
	Итого		100,0	

Согласно данным таблицы 2, основным

сульфидным минералом является пирит, содержание которого составляет 6,50%. Пирит представлен двумя генерациями:

Крупнокристаллический (0,5–2,0 мм) — трещиноватый, представляет собой благоприятную основу для нарастания халькопирита [2-4].

Мелкозернистый (менее 0,05 мм) — часто содержит эмульсионную вкрапленность золота и халькопирита и трудно раскрывается в процессе измельчения.

Основным носителем меди является халькопирит, содержание которого составляет 1,72%. Он образует плотные сростания с пиритом, поэтому для получения кондиционного концентрата требуется тонкое измельчение (до 80–90 % класса –0,074 мм). Молибденит встречается в виде изогнутых чешуек размером 0,01–0,1 мм и часто связан с трещинами в кварце. Это облегчает его раскрытие, однако из-за мягкости создает риск переизмельчения («намазывания») [2].

Такое взаимосвязанное нахождение минералов, особенно распределение золота в различных минеральных ассоциациях, имеет важное значение при выборе схемы обогащения. Поэтому необходимо отдельно рассмотреть формы нахождения золота. В медно-порфировых рудах золото распределено по следующим основным ассоциациям [5-6]:

Свободное золото — около 35 %;

Сростания с халькопиритом — 25 %;

Включения в пирите (упорное золото) — 30 %;

Включения в кварце — 10 %.

Приведенные минералогические особенности показывают, что для данного типа сырья характерна крайне неравномерная и тонкая вкрапленность. Размер сульфидных зерен часто составляет менее 10–20 мкм, поэтому для их полного раскрытия требуется тонкое измельчение руды. Как показано технологическими зависимостями, при увеличении содержания класса –0,074 мм в питании флотации до 80–90 % достигается максимальное извлечение меди (около 89 %) и золота (около 78 %) [6].

Вместе с тем при оценке технологических свойств руды необходимо учитывать, с какими минералами ассоциированы благородные метал-

лы. В медно-порфировых рудах золото и серебро могут находиться как в свободной форме (самородное золото, электрум), так и в «упорной», связанной форме (тонкодисперсные включения в сульфидах). Исследования месторождений Центральной Азии, включая Алмалыкский регион, показывают тесную связь благородных металлов с пиритом и халькопиритом.

Минеральный состав типичной медно-порфировой руды, характерной для месторождений медно-порфирового типа, приведен на рисунке 1.



Рис.1. Средний минеральный состав сульфидной медно-порфировой руды.

Технологические свойства руды непосредственно связаны с описанной выше минералогической структурой и характером вкрапленности ценных компонентов. Для полиметаллических руд, содержащих благородные металлы, характерна крайне неравномерная и тонкая вкрапленность. Размер сульфидных зерен часто изменяется от десятых долей миллиметра до микроскопических включений размером менее 10–20 мкм. Это требует применения сложных схем рудоподготовки для достижения необходимой степени раскрытия минералов перед флотацией.

Анализ форм нахождения золота показывает, что его значительная часть связана с сульфидными минералами. На рисунке 2 приведена диаграмма распределения форм нахождения золота в зависимости от минерал-носителя, что является важным фактором при выборе схемы обогащения.

Как видно из диаграммы, значительная доля золота связана с пиритом. Это создает технологические трудности при получении

кондиционного медного концентрата. Если в процессе флотации не применять специальные реагентные режимы или дополнительные схемы извлечения, часть золота, связанного с пиритом, будет теряться с хвостами.

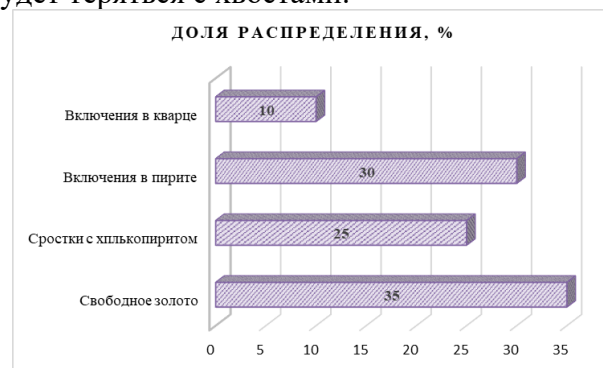


Рис.2. Распределение форм нахождения золота по минеральным ассоциациям в полиметаллических рудах.

Анализ ограничений базовых схем обогащения. В современной практике переработки медно-порфировых руд доминирует метод коллективно-селективной флотации. При базовом режиме обогащения показатели распределения металлов выглядят следующим образом:

Таблица 3.

Базовые технологические показатели обогащения медно-порфировой руды

Продукт обогащения	Выход, %	Содержание Cu , %	Содержание Au , г/т	Извлечение Cu , %	Извлечение Au , %
Медный концентрат	2,8	24,5	18,4	85,1	62,3
Молибденовый промпродукт	0,45	1,2	5,6	0,65	3,1
Пиритный концентрат	6,5	0,35	2,1	2,8	16,5
Отвальные хвосты	90,25	0,1	0,1	11,45	18,1
Исходная руда	100	0,81	0,83	100	100

Данные таблицы свидетельствуют о невысоком сквозном извлечении золота (всего 62,3%). Основные потери благородного металла происходят с пиритным концентратом (16,5%) и отвальными хвостами (18,1%). Ключевой причиной этого является депрессия пирита известью (CaO) при повышении pH среды до 11–12, что необходимо для получения кондиционного медного концентрата, но неизбежно уводит ассоциированное с пиритом золото в хвосты. Кроме того, чрезмерное повышение щелочности ($\text{pH} > 10,5$) негативно сказывается на флотируемости самого золота.

Потери на стадии обогащения

(отвальные хвосты). Общие потери золота в хвостах флотации классифицируются по трем направлениям:

Инкапсулированное в силикатах золото (38%): механические потери, обусловленные микронными включениями ценного компонента в кварцевой матрице, которые не раскрываются при стандартном помоле.

Связанное с пиритом упорное золото (32%): физико-химические потери, вызванные тонкодисперсной вкрапленностью или твердым раствором золота в депрессируемом железистом сульфиде.

Свободное тонкое золото и шламы менее 20 мкм (20%): гидродинамические потери мелких частиц, обладающих низкой кинетикой флотации. Ситуация усугубляется «эффектом натирания» в мельницах, когда поверхность золотин покрывается гидрофильными пленками шламов и оксидов, пассивируя их активность.

Пассивированное золото, покрытое оксидными пленками (10%).

Потери при металлургическом переделе. На этапе пирометаллургической плавки медных концентратов (в печах Ванюкова или взвешенной плавки) благородные металлы переходят в штейн, однако часть из них безвозвратно теряется с отвальными шлаками.

Установлено, что растворимость золота в силикатных расплавах крайне низка. Коэффициент распределения золота между штейном и шлаком при промышленных параметрах плавки достигает значений 25. Следовательно, потери носят преимущественно механический характер и вызваны захватом мельчайших капель (корольков) богатого штейна вязкой шлаковой средой. Существует прямая линейная корреляция между остаточным содержанием меди и золота в отвальных шлаках, что позволяет использовать содержание меди в качестве индикатора потерь благородных металлов.

Интеграция комбинированных технологических решений. Для преодоления физических ограничений флотации и минимизации сквозных потерь рекомендуется переход к разветвленной комбинированной схеме, интегрирующей гравитационные, флотационные и гидрометаллургические циклы.

Основные элементы концептуальной схемы:

Центробежная концентрация в цикле измельчения: Использование высокоэффективных центробежных концентраторов (типа Knelson или Falcon) при факторе разделения 60–100 G позволяет извлекать свободное крупное золото на ранних стадиях («в голове процесса»). Это предотвращает его переизмельчение, деформацию и ошламование.

Скоростная флотация (Flash Flotation): Установка флотомашин на песках гидроциклонов позволяет оперативно выводить крупные, уже раскрытые зерна халькопирита и ассоциированного золота, снижая циркуляционную нагрузку на мельницы.

Химико-металлургическая переработка упорного пиритного продукта: Выделенный в отдельный поток золотосодержащий пиритный концентрат должен подвергаться деструкции одним из современных методов: биоокислением (BIOX), автоклавным окислением (POX) или ультратонким помолом (Albion Process) с последующим интенсивным выщелачиванием.

Модификация реагентного режима: Замена чистых ксантогенатов на сочетания дитиофосфатов и тионокарбаматов повышает селективность флотации золота в присутствии пирита.

Закключение. Медно-порфировые руды месторождения «Ёшлик I» представляют собой сложную многокомпонентную систему, где золото имеет полигенный характер и тесно ассоциировано как со свободными фракциями, так и с сульфидами железа и меди [5-10].

Базовые флотационные схемы, нацеленные исключительно на извлечение меди, приводят к потере до 35–40% золота с отвальными хвостами и шлаками металлургического передела.

Единственным экономически и технологически оправданным направлением модернизации производства является внедрение комбинированных схем. Включение центробежной гравитации в замкнутый цикл измельчения позволяет вывести 15–25% золота в товарный продукт до начала флотации, а гидрометаллургическое вскрытие пиритного промпродукта обеспечивает извлечение

упорных субмикроскопических форм золота. Согласно мировому опыту, внедрение подобного разветвленного подхода обеспе-

чивает прирост сквозного извлечения металлов на 4–8%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Стратегия развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы: Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60. (2022).
- [2] Постановление Президента Республики Узбекистан «О мерах по расширению производственных мощностей АО «Алмалыкский ГМК» на базе месторождения «Ёшлик I» от 1 марта 2017 года № ПП-2807. (2017).
- [3] ГОСТ 14180-80. Руды и концентраты цветных металлов. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения влаги. (2010). Москва: Стандартинформ.
- [4] ГОСТ 32221-2013. Концентраты медные. Методы анализа. (2014). Москва: Стандартинформ.
- [5] Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». (2018). СТП НИТУ МИСиС 02-2018. Общие требования к построению, изложению и оформлению диссертаций и авторефератов диссертаций. Москва: НИТУ «МИСиС».
- [6] Абрамов, А. А. (2008). Флотационные методы обогащения: Учебник для вузов (3-е изд., перераб. и доп., Т. 4). Москва: Изд-во МГГУ.
- [7] Абрамов, А. А. (2010). Собрание сочинений. Т. 8: Флотация. Физико-химическое моделирование процессов. Москва: Горная книга.
- [8] Андреев, Е. Е., & Тихонов, О. Н. (2007). Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: Учебник. Санкт-Петербург: СПГГИ.
- [9] Бочаров, В. А., Игнаткина, В. А., & Абдрахимова, И. Р. (2011). Технология переработки золотосодержащего сырья. Москва: Издательский дом МИСиС.
- [10] Бочаров, В. А., & Игнаткина, В. А. (2007). Технология обогащения полезных ископаемых. Том 1: Обогащение руд цветных металлов. Москва: Издательский дом «Руда и Металлы».

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Аскаров, А. М., & Мамайсакова, З. Б. (2026). Технологические основы снижения потерь благородных металлов при комплексной переработке медно-порфировых руд. Цифровые технологии в промышленности, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.35>

GEOLOGIYA VA NEFT-GAZ SANOATI
ГЕОЛОГИЯ И НЕФТЕГАЗОВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ
GEOLOGY AND OIL-GAS INDUSTRY

UO‘K: 622.276.5:622.692.23

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.5

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

KO‘KDUMALOQ KONIDA TOVAR NEFTINI REZERVUARLARDA
SAQLASHDA BUG‘LANISH YO‘QOTISHLARINI KAMAYTIRISHNING
TEXNIK-IQTISODIY SAMARADORLIGI



Norqulov Shohbozbek Samandar o'g'li

Katta o'qituvchi, Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O'zbekiston

E-mail: shaxbozbeknorqulov@gmail.com

ORCID ID: 0000-0001-5112-3500

Science ID: MQD-0726-0406

Annotatsiya. Maqolada Ko 'kdumaloq neftni tayyorlash qurilmasining RVS-4000 №3 tovar rezervuarida yengil uglevodorod fraksiyalarining bug 'lanishidan yuzaga keladigan yo 'qotishlar baholangan. "Kichik nafaslar", "katta nafaslar" va "teskari nafas chiqarish" bo 'yicha yillik yo 'qotishlar tarkibi aniqlanib, rezervuarni to 'ldirish-bo 'shatish sikllari chastotasining ta'siri tahlil qilingan. Ochiq rangli qoplama, disk-qaytargich, zichlovchi zatvorli ponton va azot yostiqchasi variantlari taqqoslangan. Texnologik va ekspluatatsion mezonlar bo 'yicha zichlovchi ponton maqbul yechim sifatida asoslangan. Neftning texnologik rezervuarda bo 'lish vaqtini 3 sutkadan 2 sutkagacha qisqartirish va 4000 m³ rezervuar o 'rniga 2000 m³ pontonli rezervuardan foydalanish bilan birga kompleks tadbirlar yiliga 121 tonna neftni saqlab qolishi, yillik iqtisodiy samara esa 56 102 AQSH dollari yoki 718,106 mln so 'mni tashkil etishi ko 'rsatilgan.

Kalit so 'zlar: neft rezervuari, bug 'lanish yo 'qotishlari, katta nafas, kichik nafas, ponton, texnologik maqbullashtirish, iqtisodiy samaradorlik.

Received: 25.07.2026

Accepted: 01.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СНИЖЕНИЯ
ПОТЕРЬ НЕФТИ ОТ ИСПАРЕНИЯ ПРИ РЕЗЕРВУАРНОМ ХРАНЕНИИ
НА МЕСТОРОЖДЕНИИ КОКДУМАЛАК

Норкулов Шохбозбек Самандар угли

Старший преподаватель, Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В статье оценены потери лёгких фракций нефти от испарения в товарном резервуаре РВС-4000 №3 установки подготовки нефти месторождения Кокдумалак. Определена

структура годовых потерь от «малых дыханий», «больших дыханий» и обратного выдоха, а также проанализировано влияние числа циклов заполнения и опорожнения. Сопоставлены светлое покрытие резервуара, диск-отражатель, герметизирующий понтон и хранение под избыточным давлением азота. По совокупности технических и эксплуатационных критериев обосновано применение герметизирующего понтона. Комплексная оптимизация позволяет сохранить 121 т нефти в год и получить экономический эффект 56 102 долл. США или 718,106 млн сум в год.

Ключевые слова: нефтяной резервуар, потери от испарения, большие дыхания, малые дыхания, понтон, технологическая оптимизация, экономическая эффективность.

TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF REDUCING EVAPORATION LOSSES DURING TANK STORAGE OF CRUDE OIL AT THE KOKDUMALAK FIELD

Norkulov Shokhbozbek Samandar ugli

Senior Lecturer, Islam Karimov Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. The paper evaluates evaporation losses of light hydrocarbon fractions from crude oil stored in the RVS-4000 No. 3 product tank at the Kokdumalak oil treatment facility. Annual losses caused by standing breathing, working breathing and reverse breathing were quantified, and the effect of tank filling–emptying frequency was examined. Reflective coating, reflector disk, a sealed internal floating pontoon and nitrogen blanketing were compared. Considering both technical performance and operational feasibility, the sealed pontoon was selected as the preferred option. Combined process optimization can retain 121 tonnes of oil per year and provide an annual economic benefit of USD 56,102, equivalent to UZS 718.106 million.

Keywords: oil storage tank, evaporation loss, working breathing, standing breathing, floating pontoon, process optimization, economic efficiency.

Kirish. Neftni qazib olish, yig'ish, tayyorlash, saqlash va iste'molchiga yetkazib berish bosqichlarini qamrab oluvchi texnologik jarayon davomida mahsulotning ma'lum ulushi bug'lanish, gaz fazasiga o'tishi, oqova suv tarkibi bilan chiqib ketishi hamda texnologik uskunalar va quvurlarning hermetikligi buzilishi oqibatida yo'qotiladi. Saqlash bosqichida ayniqsa yengil uglevodorod fraksiyalari rezervuar gaz bo'shlig'iga o'tadi va nafas olish armaturasi orqali atmosferaga chiqariladi. Mazkur yo'qotishlar nafaqat mahsulot massasining kamayishiga olib keladi, balki yengil uglevodorod fraksiyalarining bug'lanishi natijasida neftning fraksion tarkibida ham o'zgarishlar yuz berib, uning tarkibi nisbatan og'irlashadi, to'yingan bug' bosimi pasayadi, tovar sifati yomonlashadi va atmosfera havosiga uchuvchan organik birikmalar tashlamasi ortadi [1–3].

Vertikal po'lat rezervuarlarda bug'lanish natijasida yuzaga keladigan yo'qotishlar bir necha turga ajratiladi. Ularning asosiy qismi rezervuar gaz

bo'shlig'idagi harorat va bosimning kun davomida o'zgarishi sababli sodir bo'ladigan "kichik nafas olish", rezervuar mahsulot bilan to'ldirilganda bug'-havo aralashmasining tashqariga siqib chiqarilishi bilan bog'liq «katta nafas olish» hamda rezervuar bo'shatilgandan so'ng ichki gaz fazasining qayta to'yinishi natijasida kuzatiladigan teskari nafas jarayonlari hisobiga yuz beradi [4–6]. Bug'lanish yo'qotishlarining miqdori rezervuarining foydali sig'imi, mahsulot bilan to'ldirish darajasi, aylanish intensivligi, hududning iqlim sharoiti, neftning to'yingan bug' bosimi hamda rezervuarining konstruktiv xususiyatlari va texnik jihozlanishiga bevosita bog'liq [7–9].

Mazkur tadqiqotning maqsadi Ko'kdumaloq neftni tayyorlash qurilmasidagi RVS-4000 №3 tovar rezervuari misolida bug'lanish yo'qotishlarining tarkibini aniqlash, to'ldirish-bo'shatish rejimining ta'sirini baholash, yo'qotishlarni kamaytiruvchi texnik vositalarni taqqoslash hamda kompleks chora-tadbirlarning

texnik-iqtisodiy samaradorligini asoslashdan iborat.

Hisob-kitoblar uchun Ko'kdumaloq konida ekspluatatsiya qilinayotgan nominal sig'imi 4000 m³ bo'lgan RVS-4000 №3 tovar rezervuari tanlandi. Mazkur rezervuar tayyorlangan tovar neftini qabul qilish, vaqtinchalik saqlash va keyingi transport tizimiga uzatish jarayonlarida foydalaniladi. Hisoblash ishlari kon sharoitida olingan ekspluatatsion ma'lumotlar, laboratoriyada aniqlangan neftning to'yingan bug' bosimi ko'rsatkichlari, rezervuar parkining texnik tavsiflari hamda yillik mahsulot aylanish hajmlariga asoslandi. Bug'lanish natijasidagi yo'qotishlarni baholashda moddiy balans usuli bilan bir qatorda rezervuarlarning "nafas olish" jarayonlarini hisobga oluvchi N.N. Konstantinov va V.I. Chernikin tomonidan ishlab chiqilgan hisoblash tamoyillaridan foydalanildi [4–6].

Yillik umumiy bug'lanish yo'qotishi uch tarkibiy qism yig'indisi sifatida baholandi:

$$M_y = M_{kn} + M_{ka} + M_{tn}, \quad (1)$$

bu yerda M_y - yillik umumiy bug'lanish yo'qotishi; M_{kn} - "kichik nafaslar"dan; M_{ka} - "katta nafaslar"dan; M_{tn} - teskari nafas chiqarishdan yo'qotishlar. "Katta nafaslar" va teskari nafas chiqarish bo'yicha yillik miqdor bir sikldagi yo'qotishning yillik sikllar soniga ko'paytmasi orqali aniqlandi. Hisoblashlarda rezervuarining ekspluatatsiya rejimi sifatida yil davomida 21 marta mahsulotni to'ldirish va bo'shatish sikli amalga oshirilishi qabul qilindi.

1-jadval

RVS-4000 №3 rezervuarida yillik bug'lanish yo'qotishlarining tarkibi

Yo'qotish turi	Bir davrdagi miqdor, kg	Yillik yo'qotish, t/yil
«Kichik nafaslar»	13,45 (sutka)	4,91
«Katta nafaslar»	659,34 (sikl)	13,85
Teskari nafas chiqarish	21,11 (sikl)	0,44

Texnik yechimlarni baholash jarayonida faqat bug'lanish yo'qotishlarini kamaytirish darajasi emas, balki ularni amaldagi rezervuar sharoitida joriy etish imkoniyati, qo'shimcha energiya va kimyoviy reagentlar sarfi, tizimning germetikligini ta'minlash murakkabligi, texnik xizmat ko'rsatish xarajatlari hamda sanoat xavfsizligi talablariga muvofiqligi ham kompleks ravishda inobatga

olindi. Bunday ko'p mezonli yondashuv resurslarni tejovchi va amaliy jihatdan samarali saqlash texnologiyasini tanlash uchun muhim ahamiyat kasb etadi [8–11].

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Hisoblash natijalariga ko'ra, Ko'kdumaloq konidagi RVS-4000 №3 rezervuarida bug'lanish tufayli yuzaga keladigan yillik neft yo'qotishlari 19,20 t/yilni tashkil etdi. Tahlillar shuni ko'rsatdiki, umumiy yo'qotishlarning eng katta ulushi rezervuarni mahsulot bilan to'ldirish jarayonida sodir bo'ladigan "katta nafas olish" hodisasi hissasiga to'g'ri kelib, uning miqdori 13,85 t/yil yoki jami yo'qotishlarning 72,14 foizini tashkil etdi. «Kichik nafaslar»dan yo'qotishlar 4,91 t/yil yoki 25,57 foiz, teskari nafas chiqarishdan yo'qotishlar esa 0,44 t/yil yoki 2,29 foiz bo'ldi.

Natijalar. Olingan natijalar bug'lanish natijasidagi yo'qotishlarni kamaytirishda asosiy omil sutkalik harorat tebranishlaridan ko'ra rezervuar mahsulot aylanishi va uni to'ldirish rejimi ekanligini ko'rsatdi. Har bir to'ldirish jarayonida rezervuar gaz bo'shlig'ida to'plangan bug'-havo aralashmasining ma'lum qismi atmosferaga chiqarib yuboriladi. Shu bois mahsulotni qabul qilish va bo'shatish sikllari sonining ortishi bug'lanish yo'qotishlarining deyarli proporsional ravishda ko'payishiga sabab bo'ladi.

Hisoblashlar natijasida yiliga 4 ta ekspluatatsion sikl amalga oshirilganda davriy bug'lanish yo'qotishlari 2,72 t/yilni, 21 ta siklda 14,29 t/yilni, 36 ta siklda esa 24,50 t/yilni tashkil etishi aniqlandi. Bu esa rezervuarni ko'p marotaba kichik hajmdagi mahsulot bilan to'ldirishdan ko'ra, ishlab chiqarishning uzluksizligi va texnologik xavfsizlik talablarini saqlagan holda yirikroq partiyalar bilan ishlatish maqsadga muvofiq ekanligini tasdiqlaydi. Biroq rezervuarining ishchi hajmidan 95% dan ortiq darajada foydalanish tavsiya etilmaydi, chunki harorat ta'sirida mahsulot hajmining kengayishi rezervuarining toshib ketishi va avariya holatlarining yuzaga kelish xavfini oshiradi [3, 9].

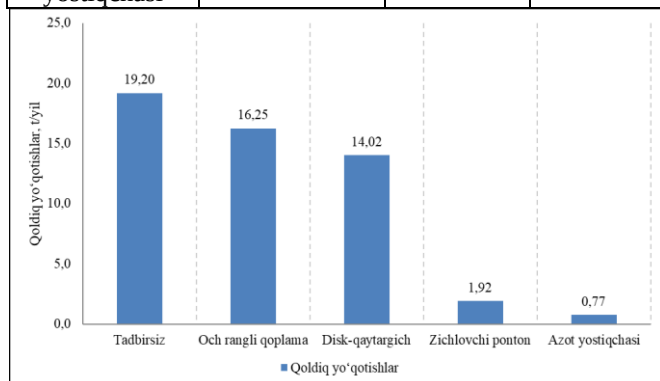
Bug'lanish yo'qotishlarini kamaytirish maqsadida to'rtta muqobil texnik yechim tahlil qilindi. Birinchi usul rezervuarining tashqi sirtiga quyosh nurlarini qaytaruvchi och rangli himoya qoplamasini qo'llash bo'lib, u devorlarning qizishini kamaytirish orqali asosan «kichik nafas

olish» yo‘qotishlarini qisqartirishga xizmat qiladi. Ikkinchi variant sifatida disk-qaytargichdan foydalanish ko‘rib chiqildi, bunda bug‘-havo aralashmasining atmosferaga chiqishi qisman cheklanadi. Uchinchi yechim — zichlovchi zatvor bilan jihozlangan pontonni o‘rnatish bo‘lib, u neft yuzasi va gaz fazasi orasidagi erkin bo‘shliq hajmini sezilarli darajada kamaytiradi. To‘rtinchi usul esa rezervuar ichida ortiqcha bosim ostida azot muhitini hosil qilishga asoslangan bo‘lib, inert gaz qatlamining shakllanishi bug‘lanish intensivligini pasaytiradi va mahsulotning atmosfera bilan bevosita aloqasini cheklaydi [10–13].

2-jadval

Bug‘lanish yo‘qotishlarini kamaytirish variantlarining taqqoslanishi

Variant	Kamaytirish samaradorligi, %	Kamaygan yo‘qotish, t/yil	Qoldiq yo‘qotish, t/yil
Tadbirsiz holat	—	—	19,20
Ochiq rangli qoplama	—	2,95	16,25
Disk-qaytargich	27	5,18	14,02
Zichlovchi zatvorli ponton	90	17,28	1,92
Azot yostiqchasi	96	18,43	0,77



1-rasm. Texnik chora-tadbirlar qo‘llangandan keyingi qoldiq yo‘qotishlar.

Muhokama. Hisoblash natijalari shuni ko‘rsatdiki, bug‘lanish yo‘qotishlarini kamaytirish bo‘yicha eng yuqori nazariy samaradorlik azot yostiqchasi qo‘llanilganda kuzatiladi. Ushbu usulda yillik qoldiq yo‘qotish 0,77 t/yilgacha kamayadi. Biroq texnologiyani amaliyotga joriy etish azotni ishlab chiqarish yoki tashqi manbadan uzatish tizimini tashkil etish, rezervuardagi ortiqcha bosimni avtomatik boshqarish vositalarini o‘rnatish,

germetiklikni doimiy nazorat qilish hamda qo‘shimcha ekspluatatsion xarajatlarni talab qiladi. Shu sababli mavjud RVS-4000 rezervuarini modernizatsiya qilish nuqtai nazaridan zichlovchi zatvor bilan jihozlangan ponton texnik va iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiqroq yechim hisoblanadi. Mazkur usul energiya sarfini talab qilmaydi, konstruktiv jihatdan sodda va ishonchli bo‘lib, bug‘lanish natijasidagi yillik yo‘qotishlarni 19,20 t dan 1,92 t gacha, ya’ni qariyb 90% ga kamaytirish imkonini beradi.

Tahlillar shuni ko‘rsatdiki, rezervuar tashqi yuzasini och rangli qaytaruvchi qoplama bilan qoplash hamda disk-qaytargichdan foydalanish alohida qo‘llanilganda yetarli darajada yuqori samaradorlikni ta’minlamaydi. Buning asosiy sababi ushbu usullar «katta nafas olish» jarayonida yuzaga keladigan bug‘-havo aralashmasining chiqarilishini to‘liq bartaraf eta olmasligidir. Shunga qaramay, ularni ponton bilan birgalikda qo‘llash rezervuarining issiqlik yuklanishini kamaytiradi va umumiy texnologik samaradorlikni oshiradi. Pontondan samarali foydalanish uchun zichlovchi elementlarning texnik holatini muntazam tekshirish, rezervuar tubida cho‘kma va korroziya jarayonlarini nazorat qilish hamda nafas olish armaturasining me’yoriy ish rejimini saqlash zarur [3, 8, 12].

Mahalliy texnik tadbirlarning maksimal samarasi ularni neftni tayyorlash va saqlash tizimi-ning umumiy texnologik rejimi bilan uyg‘unlashtirish orqali ta’minlanadi. Tadqiqot davomida neftning texnologik rezervuarda saqlanish muddatini 3 sutkadan 2 sutkagacha qisqartirish tavsiya etildi. Bunday yondashuv mahsulotning yuqori harorat ta’sirida qolish vaqtini qisqartiradi, gaz fazasining yengil uglevodorodlar bilan to‘yinish darajasini pasaytiradi hamda oraliq rezervuarlarda bajariladigan texnologik operatsiyalar sonini kamaytiradi. Natijada bug‘lanish bilan bog‘liq yo‘qotishlarni qo‘shimcha ravishda taxminan 0,1 % ga qisqartirish imkoniyati yuzaga keladi. Tovar neftini saqlashda 4000 m³ hajmli oddiy rezervuar o‘rniga 2000 m³ hajmli pontonli rezervuardan foydalanish ham taklif etildi. Kichikroq ishchi hajm mahsulot aylanmasiga mos tanlanganda rezervuar-ning ortiqcha gaz bo‘shlig‘i kamayadi, neftning uzoq turib qolishi bartaraf etiladi va operatsion boshqaruv soddalashadi. Hisoblash natijalariga

ko'ra, ushbu yechim texnologik yo'qotishlarni 0,3 foizgacha kamaytirishi mumkin.

Hisoblash natijalari shuni ko'rsatdiki, zichlovchi pontonni qo'llash, rezervuar sig'imini ishlab chiqarish oqimiga maqbullashtirish hamda neftni saqlash muddatini qisqartirishga asoslangan kompleks texnik tadbirlarni amalga oshirish orqali yiliga 121 tonna neftning yo'qotilishini oldini olish mumkin. Joriy etish dalolatnomasida qabul qilingan konversiya koeffitsiyentiga muvofiq ushbu hajm 758,1 barrel neft mahsulotiga mos keladi. Hisob-kitoblarda bir barrel neftning qiymati 74 AQSH dollari deb qabul qilinganda, mazkur tadbirlarni joriy etishdan olinadigan yillik iqtisodiy samara quyidagicha aniqlanadi:

$$E = 758,1 \times 74 = 56\,102 \text{ AQSH dollari/yil.}$$

Hisob-kitoblarda 1 AQSH dollari kursi 12 800 so'm deb qabul qilinganda, tavsiya etilgan texnik tadbirlarni amalga oshirishdan olinadigan yillik iqtisodiy samara 718,106 mln so'mni tashkil etadi. Uglevodorod bug'larining atmosferaga chiqarilishi kamayishi natijasida ekologik to'lovlar ham qisqaradi, biroq ularning ulushi mahsulotni saqlab qolish hisobiga olinadigan iqtisodiy foydaga nisbatan ancha kichikdir. Demak, taklif etilgan yechimlarning asosiy iqtisodiy afzalligi qo'shimcha neft qazib olish bilan emas, balki qazib olinib, tayyorlangan mahsulotning texnologik yo'qotilishining oldini olish bilan izohlanadi.

Tahlillar shuningdek, alohida rezervuar bo'yicha olingan natijalarni korxona miqyosidagi umumiy samaradorlik bilan aralashtirmaslik zarurligini ko'rsatdi. Jumladan, RVS-4000 №3 rezervuarida pontondan foydalanish hisobiga bug'lanish yo'qotishlari 17,28 t/yilga kamayadi. Yiliga 121 t neftni saqlab qolish ko'rsatkichi esa faqat bitta rezervuarga emas, balki neftni tayyorlash va saqlash tizimida amalga oshiriladigan bir nechta texnologik tadbirlarning kompleks natijasiga tegishlidir. Bunday yondashuv iqtisodiy hisob-kitoblarning aniqligi, shaffofligi va ularni qayta tekshirish imkoniyatini ta'minlaydi.

Tavsiya etilgan texnik yechimlarni amaliyotga joriy etish bosqichma-bosqich amalga oshirilishi maqsadga muvofiq. Dastlab rezervuar korpusining, tom qismining, nafas olish klapanlari, o'lchash lyuklari va quvur ulanishlarining germetikligi texnik diagnostika orqali baholanadi. Shu bilan birga, kamida 30 sutka davomida neft sathi,

gaz bo'shlig'i harorati va bosimining monitoringi olib boriladi. Olingan ma'lumotlar hisobiy natijalarni haqiqiy ekspluatatsiya sharoitlari bilan taqqoslash hamda pontonning optimal konstruktiv parametrlarini tanlash imkonini beradi.

Keyingi bosqichda rejali ta'mirlash ishlari davomida rezervuar zichlovchi zatvor bilan jihozlangan ponton bilan ta'minlanadi, nafas olish armaturasi me'yoriy holatga keltiriladi va tashqi sirtning quyosh nurlarini qaytarish xususiyati tiklanadi. Ponton materiali neftning fizik-kimyoviy xossalari, korroziya muhiti hamda yong'in xavfsizligi talablarini hisobga olgan holda tanlanishi lozim. Jihozlash ishlari yakunlangach, mahsulot sathi, gaz fazasi bosimi va uglevodorod bug'lari konsentratsiyasi muntazam kuzatilib, hisob-kitoblarda belgilangan taxminan 90% samaradorlik amaliy ma'lumotlar bilan tasdiqlanishi zarur.

Uchinchi bosqichda rezervuarlar parkining ekspluatatsiya rejimi optimallashtiriladi. Bunda texnologik tindirish muddati 2 sutka atrofida barqarorlashtiriladi, mahsulot oqimi 2000 m³ hajmli pontonli rezervuarlarning ishchi sig'imiga mos ravishda taqsimlanadi hamda ortiqcha to'ldirish va bo'shatish operatsiyalari imkon qadar kamaytiriladi. Har oy yakunida moddiy balans asosida saqlab qolingani mahsulot hajmi, qoldiq bug'lanish yo'qotishlari va ekspluatatsiya xarajatlari alohida tahlil qilinishi tavsiya etiladi. Bunday monitoring tizimi texnik tadbirlarning uzoq muddatli samaradorligini baholash va ularni boshqa rezervuarlarda qo'llash imkoniyatini asoslashga xizmat qiladi.

Mazkur texnologiyani boshqa obyektlarda joriy etishda har bir rezervuarining o'ziga xos ekspluatatsion sharoitlari hisobga olinishi zarur. Xususan, rezervuar sig'imi, yillik mahsulot aylanish hajmi, neftning to'yingan bug' bosimi hamda hududning iqlim xususiyatlari qayta baholanishi lozim. Shu sababli RVS-4000 №3 rezervuari uchun aniqlangan 19,20 t/yil bug'lanish yo'qotishlarini boshqa obyektlarga to'g'ridan-to'g'ri qo'llash ilmiy jihatdan asosli hisoblanmaydi. Chunki yo'qotishlar miqdori gaz bo'shlig'i hajmi, mahsulot aylanish intensivligi va to'ldirish sikllari soniga bevosita bog'liq. Har bir obyekt uchun boshlang'ich monitoringni tashkil etish, individual moddiy balansni yuritish hamda rezervuarining ish rejimini raqamli jurnal orqali qayd etish maqsadga muvofiqdir. Ayniqsa, yoz oylarida sutkalik harorat tebranishlari

va rezervuarni to'ldirish tezligini muntazam qayd etish hisoblash modelining ishonchliligini oshiradi.

Texnik tadbirlarning samaradorligini baholashda uchta asosiy ko'rsatkichdan foydalanish tavsiya etiladi. Birinchi ko'rsatkich – tayyorlangan neftning har bir tonnasiga to'g'ri keladigan texnologik yo'qotish ulushi, ikkinchisi – rezervuar bo'yicha yil davomida qayd etilgan qoldiq bug'lanish yo'qotishlari massasi, uchinchisi esa saqlab qolingani mahsulot qiymatining qo'shimcha ekspluatatsiya xarajatlariga nisbati hisoblanadi. Pontonning zichlovchi elementlari eskirganda yoki rezervuar ish rejimi o'zgarganda bug'lanish yo'qotishlari yana ortishi mumkin. Shu sababli texnik yechimlarning samaradorligi faqat dastlabki hisob-kitoblar bilan emas, balki kamida har chorakda o'tkaziladigan monitoring natijalari orqali muntazam tasdiqlanib borilishi lozim. Mazkur yondashuv resurslarni tejashga qaratilgan texnik tadbirlarni formal choralar darajasida emas, balki amaliy boshqaruv vositasi sifatida samarali qo'llash imkonini beradi.

Xulosa.

– Ko'kdumaloq NTQdagi RVS-4000 №3 tovar rezervuarida bug'lanishdan umumiy yo'qotish 19,20 t/yil bo'lib, uning 72,14 foizi «katta nafaslar» hisobiga shakllanadi.

– To'ldirish-bo'shatish sikllari soni oshishi bilan davriy yo'qotishlar deyarli chiziqli ko'payadi; shu sababli rezervuar aylanmasini barqarorlashtirish

va ortiqcha operatsiyalarni kamaytirish zarur.

– Azotli himoya muhitidan foydalanish bug'lanish yo'qotishlarini kamaytirishda qariyb 96 % gacha bo'lgan yuqori nazariy samaradorlikni ta'minlashi mumkin. Biroq amaldagi ishlab chiqarish sharoitlari, ekspluatatsiya qulayligi, qo'shimcha energiya talab qilinmasligi va texnik xizmat ko'rsatishning soddaligi hisobga olinganda, zichlovchi zatvorli pontondan foydalanish 90 % lik kamaytirish samarasi bilan eng maqbul texnik yechim sifatida baholandi.

– RVS-4000 №3 rezervuarida zichlovchi ponton o'rnatilishi natijasida bug'lanish bilan bog'liq yillik yo'qotishlar miqdori 19,20 t/yildan 1,92 t/yilgacha kamayishi aniqlandi.

– Neftning texnologik rezervuarda saqlanish muddatini 3 sutkadan 2 sutkagacha qisqartirish hamda katta sig'imli rezervuar o'rniga ishlab chiqarish oqimiga moslashtirilgan 2000 m³ hajmli pontonli rezervuardan foydalanish neftni tayyorlash va saqlash tizimining umumiy samaradorligini oshirish imkonini beradi.

– Taklif etilgan kompleks texnologik tadbirlarni amalga oshirish natijasida yiliga 121 tonna neft mahsulotini saqlab qolish imkoniyati yaratiladi. Ushbu natija iqtisodiy jihatdan 56 102 AQSH dollari yoki 718,106 mln so'm miqdoridagi yillik samaraga teng.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] NGH 39.0-033:2013. (2013). O'zbekiston Respublikasi neft-gaz qazib chiqarish korxonalarida neftning texnologik yo'qotishlarini aniqlash bo'yicha uslubiy ko'rsatmalar.
- [2] ГОСТ 1756-2000. (2000). Нефтепродукты. Определение давления насыщенных паров.
- [3] ГОСТ 31385-2008. (2010). Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Стандартинформ.
- [4] Константинов, Н. Н. (1961). Борьба с потерями от испарения нефти и нефтепродуктов. ГНТИ нефтяной и горно-топливной литературы.
- [5] Абузова, Ф. Ф., & Черников, В. И. (1966). Потери нефтепродуктов и нефти при испарении из подземных резервуаров. Недра.
- [6] Лутошкина, Г. С. (1977). Сбор и подготовка нефти, газа и воды. Недра.
- [7] Аренистер, В. В. (1975). Техничко-экономический анализ потерь нефти и нефтепродуктов. Химия.
- [8] Коршак, А. А., Блинов, И. Г., & Новосёлов, В. Ф. (1991). Системы улавливания лёгких фракций нефти и нефтепродуктов из резервуаров. Уфимский нефтяной институт.
- [9] Земенков, Ю. Д., Малюнин, Н. А., Маркова, Л. М., и др. (1998). Резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов: Курс лекций. ТюмГНГУ.

- [10] Попова, З. А., Ржавский, Е. Л., & Романова, Л. П. (1972). Борьба с потерями нефти и нефтепродуктов. Недра.
- [11] Блинов, И. Г., Герасимов, В. В., Коршак, А. А., Новосёлов, В. Ф., & Седелев, Ю. А. (1990). Перспективные методы сокращения потерь нефтепродуктов от испарения в резервуарах. ЦНИИТЭнефтехим.
- [12] Бешагина, Е. В., Будовая, Е. А., & Гавриков, А. А. (2013). Повышение эффективности промысловой подготовки нефти с целью сокращения потерь лёгких углеводородов на месторождении Западной Сибири. Фундаментальные исследования, (8), 545–550.
- [13] РД 39-0147103-298-88. (1988). Методика расчёта эффективности применения средств сокращения естественной убыли нефти на магистральных нефтепроводах. ВНИИСПТнефть.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Norqulov, S. S. (2026). Ko'kdumaloq konida tovar neftini rezervuarlarda saqlashda bug'lanish yo'qotishlarini kamaytirishning texnik-iqtisodiy samaradorligi. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.5>

UO'K: 533.3/9:553.078

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.17

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

BOKALI INTRUZIVI PETROGRAFIYASI VA MA'DANDORLIGI (SHIMOLIY BUKANTOV)



Rahmatullayev Ilhom Farmonqul o'g'li

Magistrant, Geologiya Fanlari universiteti, Toshkent, O'zbekiston

E-mail: rahmatullayevilhom587@gmail.com

ORCID: 0009-0006-1306-0442

Science ID: BSR-0525-0012



Ashirbekov Akabir Botirovich

Magistrant, Geologiya Fanlari universiteti, Toshkent, O'zbekiston

E-mail: ashirbekovakabir@gmail.com

ORCID: 0009-0005-8021-9572

Science ID: MSN-0826-0169

Annotatsiya. Maqolada Shimoliy Bukantov struktura-formatsion zonasida joylashgan Bokali granitoid intruzivining petrografik, mineralogik va geokimyoviy xususiyatlari umumlashtirilgan. Massivda kvarsli dioritdan mayda donador trond'yemit, plagiogranit va aplitsimon granitgacha bo'lgan to'rtta intruziv faza hamda to'rtta impulsdan iborat dayka majmuasi ajratilgan. Rogoviklarning keng rivojlangani, kaliyli metasomatoz belgilarining kuzatilmagani va yuqori magnitlanuvchanlik massivning gipabissal darajasini tasdiqlaydi. 116 ta namunaning ICP-MS tahlili keskin kontrastli geokimyoviy maydonni ko'rsatdi: Cu — 3062 g/t, Mo — 536 g/t, W — 249 g/t va Au — 0,104 g/t gacha. Eng ishonchli mahsulдор assotsiatsiya Cu–Mo–Au–As bo'lib, Mo–W–Re majmuasi yuqori haroratli intruziv-kontakt bosqichini ifodalaydi. Janubi-g'arbiy ekzokontaktning chuqur joylashgan, oksidlanmagan shtokverk zonalari birinchi navbatdagi qidiruv obyekti sifatida ajratildi.

Kalit so'zlar: Bokali intruzivlari, Shimoliy Bukantov, tonalit, trond'yemit, skarn, mis-molibdenli ma'danlashuv, ICP-MS, geokimyoviy zonallik, litogeokimyoviy oreol, ma'dandorlik.

Received: 28.07.2026

Accepted: 30.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

ПЕТРОГРАФИЯ И РУДОНОСНОСТЬ БОКАЛИНСКОГО ИНТРУЗИВА (СЕВЕРНЫЙ БУКАНТАУ)

Рахматуллаев Илхом Фармонкул угли

Магистрант, Университет геологических наук, Ташкент,
Узбекистан

Аширбеков Акабир Ботирович

Магистрант, Университет геологических наук, Ташкент,
Узбекистан

Аннотация. В статье обобщены петрографические, минералогические и геохимические особенности Бокалинского гранитоидного интрузива, расположенного в пределах Северо-Букантауской структурно-формационной зоны (Центральные Кызылкумы, Узбекистан). Выделены четыре интрузивные фазы — от кварцевых диоритов до мелкозернистых трондьемитов, плагиогранитов и аплитовидных гранитов, с четырьмя импульсами даек. Гипабиссальный уровень становления массива подтверждается широким развитием роговиков, отсутствием калиевого метасоматоза и высокой магнитной восприимчивостью. По результатам ICP-MS-анализа 116 проб установлено резко контрастное геохимическое поле: Си до 3062 г/т, Мо до 536 г/т, W до 249 г/т, Au до 0,104 г/т. Наиболее надёжной продуктивной ассоциацией является Си–Мо–Au–As, тогда как Мо–W–Re отвечает высокотемпературной интрузивно-контактной стадии. Глубокие неокисленные штокверковые зоны юго-западного

экзоконтакта выделены как первоочередной объект поисков.

Ключевые слова: Бокалинский интрузив, Северный Букантау, тоналит, трондьемит, скарн, медно-молибденовое оруденение, ICP-MS, геохимическая зональность, литогеохимический ореол, рудоносность.

PETROGRAPHY AND ORE POTENTIAL OF THE BOKALI INTRUSION (NORTHERN BUKANTAU)

Rahmatullayev Ilhom Farmonqul ugli

Master's Student, University of Geological Sciences, Tashkent,
Uzbekistan

Ashirbekov Akabir Botirovich

Master's Student, University of Geological Sciences, Tashkent,
Uzbekistan

Abstract. The article summarizes the petrographic, mineralogical and geochemical features of the Bokali granitoid intrusion situated within the Northern Bukantau structural-formational zone (Central Kyzylkum, Uzbekistan). Four intrusive phases were distinguished, from quartz diorite to fine-grained trondhjemite, plagiogranite and aplitic granite, with a four-impulse dyke complex. The hypabyssal level is confirmed by widespread hornfels development, the absence of potassic metasomatism and high magnetic susceptibility. ICP-MS analysis of 116 samples revealed a strongly contrasting geochemical field: Cu up to 3062 g/t, Mo up to 536 g/t, W up to 249 g/t and Au up to 0.104 g/t. The most reliable productive association is Cu-Mo-Au-As, whereas Mo-W-Re characterizes the high-temperature intrusive-contact stage. The deep, unoxidized stockwork zones of the south-western exocontact are identified as a priority exploration target.

Keywords: Bokali intrusion, Northern Bukantau, tonalite, trondhjemite, skarn, copper-molybdenum mineralization, ICP-MS, geochemical zoning, lithogeochemical halo, ore potential.

Kirish. 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 hamda 2024-yil 19-fevraldagi "Respublikada mis xomashyosini chuqur qayta ishlashni yanada jadallashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-77-son qarorida istiqbolli maydonlarni kompleks geologik o'rganish va mis xomashyosi resurslarini ko'paytirish vazifalari belgilangan. Bu vazifalar Markaziy Qizilqum mintaqasidagi granitoid massivlar va ular bilan bog'liq endogen ma'danlashuvni zamonaviy analitik usullar asosida qayta baholashni dolzarb qilmoqda. Jahon amaliyotida gipabissal intruziyalar hamda dayka majmualarining mis-molibdenli va oltinli ma'danlashuv bilan genetik bog'liqligini asoslash muhim yo'nalishga aylandi [5; 9; 10].

Bokali intruzivi Shimoliy Bukantov struktura-formatsion zonasidagi eng yirik granitoid jism bo'lib, uning janubi-g'arbiy ekzokontaktida mis-molibdenli (oltin tutuvchi) Orazali ma'dan namoyoni joylashgan. Massivning petrografik tarkibi o'tgan asrning 70-yillarida batafsil

o'rganilgan bo'lsa-da, ma'dandorligi ko'p elementli analitik usullar bilan yetarlicha baholanmagan. Tadqiqotning maqsadi — Bokali intruzivi tog' jinslarining petrografik-mineralogik xususiyatlarini umumlashtirish va ICP-MS ma'lumotlari asosida massiv hamda uning kontakt zonasi ma'dandorligini baholashdan iborat.

Adabiyotlar tahlili. Bukantov tog'larini rejali geologik o'rganish 1953-yilda 1:100 000 masshtabli davlat syomkasi bilan boshlangan. 1956–1957-yillarda K. K. Pyatkov va A. K. Buxarin mintaqaning 1:200 000 masshtabli yig'ma geologik xaritasini tuzdilar [1]. Bokali massivini maxsus petrografik va mineralogik-geokimyoviy o'rganish 1967-yilda Z. A. Yudalevich va G. G. Sandomirskiy tomonidan bajarilib, gabbro — diorit — tonalit — trond'emit — plagiogranit — biotitli granit yosh ketma-ketligi hamda dayka jinslarining to'rtta ritmi ajratildi. E. P. Izox bilan birgalikda Bokali tonalit-trond'emit majmuasi asoslangan [2]. 1974–1976-yillarda Ya. B. Aysanov va A. I. Yegorov 1:50 000 masshtabli syomka o'tkazib, intruziv hosilalarni oltita majmuaga bo'ldilar va massivning fatsial tuzilishini tavsifladilar (Aysanov Ya. B.). Hududning struktura-tektonik asosi mintaqaviy

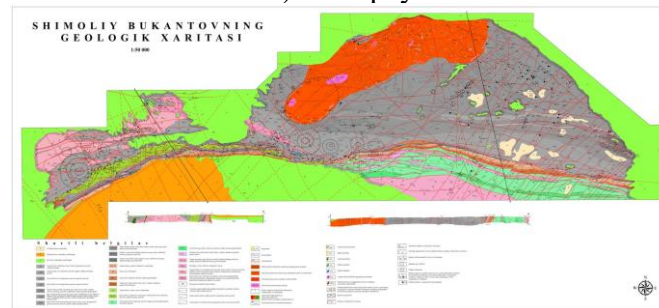
rayonlashtirish [1], paleozoy geodinamikasi [3], halqasimon tuzilmalar [4] va geofizik maydonlar [13] bo'yicha ishlarda shakllantirilgan. Ma'danlashuvning geokimyoviy qidiruv mezonlari ko'rib chiqilgan [12; 14].

Intruzivning yoshi uzoq vaqt munozarali bo'lib keldi: I. H. Hamrabayev uni C_3-P_1 , Z. A. Yudalevich va E. P. Izox esa C_{1-2} ga tegishli deb hisoblagan [2]. Massivning arxar (C_{2ar}) va ashibuloq (C_3) svitalari yotqiziqlarini yorib o'tishi hamda 274–296 mln yil oralig'idagi mutlaq yosh ma'lumotlari C_3-P_1 variantini tasdiqlaydi (Aysanov Ya. B.) va Tyan-Shan orogen kamarida gersin postkollizion magmatizmining asosiy impulsi kechki karbon — erta permga to'g'ri kelishi haqidagi U-Pb natijalari bilan uyg'undir [11]. Orazali obyekti bo'yicha asosiy materiallar fond hisobotlarida jamlangan (Vorobyov A. Yu., Denejkin V. A.), biroq intruziv jinslari ma'dan elementlari bo'yicha asosan yarim miqdoriy spektral tahlil darajasida baholangan. Mis-porfir va skarn tizimlarining zamonaviy modellari [9; 10] bunday obyektlarni ko'p elementli geokimyo va metasomatik zonallik nuqtai nazaridan qayta talqin qilishni talab etadi. Mazkur ishda aynan shu bo'shliqni to'ldirishga harakat qilindi.

Tadqiqot metodologiyasi. Ishda dala-geologik, petrografik, mineragrafik, geokimyoviy va grafik-kartografik usullar majmuasidan foydalanildi. Dala bosqichida intruzivning endo- va ekzokontakt zonalari bo'ylab marshrutlar bajarilib, namunalar olindi. Petrografik tadqiqotlar 100 dan ortiq shlifda qutblovchi mikroskopda, ma'dan minerallari esa sayqallangan anshliflarda qaytgan yorug'likda 100–1000 marta kattalashtirishda o'rganildi. Geokimyoviy tahlil 116 ta namunada induktiv bog'langan plazmali mass-spektrometriya (ICP-MS) usulida 13 ta element (Mo, Cu, W, Re, Ag, Au, Pb, Zn, As, Se, Sb, Te, Bi) bo'yicha bajarildi. Natijalar klark konsentratsiya koeffitsiyenti ($KK = \text{namunadagi miqdor} / \text{klark}$) va mahalliy fon qiymatlari asosida talqin qilinib [6; 7], elementlar taqsimoti olti sinfli intervallarga ajratildi. O'zaro bog'lanishlar o'nlik logarifmga o'tkazilgan qiymatlar bo'yicha Pearson matritsasi orqali baholandi. Aniqlash chegarasidagi shartli qiymatlar ko'p takrorlangani bois Ag, Se, Sb, Te, Re va Bi korrelyatsiyalari ushbu qatorlar chiqarib tashlangan variant bilan qiyoslandi. Birlamchi

litogeokimyoviy oreollar 1:25 000 masshtabda geoaxborot tizimida qurildi, erozion kesim darajasi multiplikativ zonallik koeffitsiyenti orqali baholandi [8].

Tahlil va natijalar. Bokali intruzivi Shimoliy Bukantov struktura-formatsion zonasida turli yo'nalishdagi ikkita tektonik zona kesishgan tugunda joylashgan (1-rasm). U shimoli-sharqqa cho'zilgan, maydoni 176 km², kengligi 6,0–6,5 km, uzunligi 27 km gacha. Kontaktlari tik (60–70°) bo'lib, qamrovchi jinslar ostiga qiyalangan. Gravimagnit ma'lumotlarga ko'ra, maksimal qalinlik (4–5 km) shimoli-sharqiy qismga to'g'ri keladi; jism shakli qo'ziqorinsimon va assimetrik. Intruziv arxar svitasining qumtosh-slanesli hamda ashibuloq svitasining molassoid yotqiziqlarini yorib o'tgan; kontakt bo'ylab qalinligi 100–200 m bo'lgan rogoviklashgan va skarnlashgan zona vujudga kelgan. Massivning gipabissal darajada joylashganini aplit-pegmatitlarning kamligi va porfirit daykalarining ko'pligi, plagioklazning barqaror zonalligi, rogoviklarning keng rivojlanishi, kaliyli metasomatoz o'rniga albitlanish va epidotlanishning ustunligi hamda yuqori magnitlanuvchanlik (asosiy massiv uchun $400-600 \cdot 10^{-6}$, spessartit daykalari uchun $1300-3700 \cdot 10^{-6}$ SGS birlik) tasdiqlaydi.



1-rasm. Shimoliy Bukantovning geologik xaritasi va unda Bokali intruzivining joylashuvi (Denejkin V. A.).

Petrografik tavsifi. Massivda to'rtta intruziv faza ajratiladi. I faza — o'rta donador kvarsli diorit va dioritlar. Ular tonalitlar orasida ksenolit va blok-ksenolitlar ko'rinishida saqlangan; strukturasi gipidiomorf-donador, plagioklaz andezin tarkibiga javob beradi. II faza — gneyssimon tonalit va tonalit-porfirlar. Ular kuchli kataklazlangan bo'lib, avtoskarnlanish, epidotlanish va biotitlanish bilan qamralgan. III (asosiy) faza — porfirsimon biotit-rogovaya obmankali trond'emit va tonalitlar bo'lib,

massivning 90–95% ini tashkil etadi (2-rasm). Tonalitlar chekka qismda 0,8–3 km kenglikdagi tasmani, trond'emitlar esa markaziy qismini egallaydi. IV faza — mayda donador trond'yemit, aplitsimon plagiogranit va granitlarning 10 × 20 dan 200 × 500 m gacha bo'lgan shtoksimon tanalaridir. Plagiogranit va aplitsimon granit kaliyli dala shpati miqdori bo'yicha farqlanadi (mos ravishda 5–10 va 15–20%). Jins hosil qiluvchi minerallarning miqdoriy nisbatlari 1-jadvalda, tipik jinslarning mikroskopik ko'rinishi 2-rasmda berilgan. Intruzivning asosiy daykali fazalaridan diorit porfirit va lamprofirlar 3-rasmda keltirilgan.

1-jadval

Bokali intruzivining asosiy fazalaridagi tog' jinslarining mineral tarkibi, %

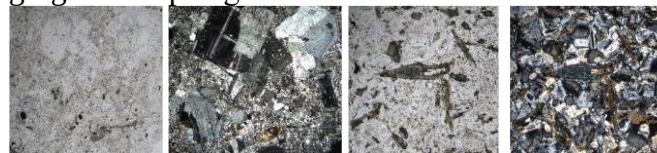
Faza va tog' jinsi	Pl	Kvars	KDSh	Rog. obm.	Biotit	Aksessorlar
I. Diorit, kvarsli diorit	50–75	8–10	2–3	8–30	6–20	sfen, apatit, sirkon, magnetit, ortit
II. Gneyssimon tonalit, tonalit-porfir	70	20	2	2	4	magnetit, ortit, sfen, apatit
III. Porfirsimon tonalit, trond'emit (asosiy faza)	50–80	8–20	3–10	5–20	2–8	apatit, magnetit, sirkon, sfen, ortit
IV. Mayda donador trond'emit, plagiogranit	55–78	20–27	5–10	5–10	10–12	sfen, apatit, sirkon, ma'danli
IV. Aplitsimon granit	30–38	25–30	25–40	—	5	magnetit, apatit, sfen, muskovit



2-rasm. Bokali intruzivining asosiy fazasi jinslari:
a, b — amfibol-biotitli tonalit (BK-78); d, e — amfibol-biotitli plagiogranit (BK-91); a, d — 1 nikolda, b, e — 2 nikolda; ko'rish maydoni 3,0 mm.

Kontakt oreoli. Arxar svitasi yotqiziqlarining granitoidlar bilan tutashgan qismi jadal rogoviklashgan. Rogoviklar tasmasi 0,1 dan 2,5 km gacha kenglikka ega bo'lib, tarkibida skapolit 32–45%, monoklin piroksen 31–35%, rogovaya obmanka 7–35%, epidot 5–15% va kvars 5–10% miqdorda qatnashadi. Skarnlar kamroq tarqalgan (tasmasi 10–130 m), granat-piroksenli tarkibga ega bo'lib, epidot, aktinolit va vollastonit bilan assotsiatsiyalanadi. Ularda pirit, xalkopirit, sheelit

hamda misning ikkilamchi minerallari qayd etilgan. Spektral tahlilga ko'ra, rogoviklarda mis 0,0008–0,2%, Mo, Pb, Sn va Sb 0,0001–0,05%, oltin esa 0,3 g/t gacha to'plangan.



3-rasm. Bokali intruzivining daykali faza jinslari:
a, b — diorit porfirit; d, e — spessartit; a, d — 1 nikolda, b, e — 2 nikolda; ko'rish maydoni 3,0 mm.

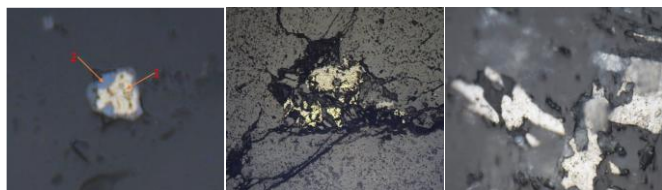
2-jadval

Bokali ma'dan-magmatik tizimida mineral hosil bo'lish etaplari

Etap va bosqich	Xarakterli mineral assotsiatsiya
I. Magmatik	plagioklaz — kvars — kaliyli dala shpati — biotit — rogovaya obmanka; aksessor apatit, sirkon, sfen, magnetit
II. Kontakt-metasomatik	skapolit — piroksen — rogovaya obmanka — epidotli rogoviklar; progressiv granat — piroksen ± sheelitli skarn; regressiv epidot — aktinolit — tremolit — xlorit + magnetit
III. Hidrotermal ma'danli	kvars — molibdenit (I–II) — pirit; xalkopirit — pirrotin — bornit — umanjit; kechki galenit — sfalerit — sof kumush
IV. Ma'danlashuvdan keyingi	kalsit — kvars
V. Gipergen	xalkozin, kovellin, kuprit, tenorit, sof mis, malaxit, gyotit-gidrogyotit, yarozi

Ma'dan minerallari va paragenesis.

Mineralogik tadqiqotlarda gipogen minerallardan molibdenit, xalkopirit, pirit, bornit, magnetit, gematit, umanjit va sof kumush, gipergen minerallardan xalkozin, kovellin, kuprit, tenorit, sof mis, malaxit, gyotit-gidrogyotit va yarozi aniqlandi (4-rasm). Xalkopirit ikki generatsiyada namoyon bo'lib, misning sanoat konsentratsiyasi ikkinchi generatsiya bilan bog'liq. Molibdenitning eng mahsuldor generatsiyasi kvars-molibdenitli bosqichda shakllangan. Mineral hosil bo'lish jarayoni besh etapga bo'linadi (2-jadval). Metasomatik zonallik uch a'zoli: ichki magnetitli, o'rta molibdenit-xalkopiritli va tashqi galenit-sfalerit-xalkopiritli zonalar. Vertikal kesimda yuqoridan pastga propilitlar, kvars-biotitli metasomatitlar va argillizitlar, jadal kvarslanish hamda albitlanish-kalishpatlanish zonolari almashinadi. Bu ketma-ketlik mis-porfir [9] va skarn [10] tizimlarining klassik modellariga mos keladi.



4-rasm. Orazali maydonining ma'danli minerallari:

a — xalkopirit (1) atrofida kovellin (2), 1000×; b — xalkopiritning ksenomorf ajrilmalari, 200×; d — molibdenitning tangachasimon ajrilmalari, 200×.

Xulosa va takliflar. Bokali intruzivi Shimoliy Bukantov struktura-formatsion zonasining kechki karbon — erta perm (274–296 mln yil) tonalit-trond'emit majmuasiga mansub, maydoni 176 km² bo'lgan ko'p fazali gipabissal massivdir. Uning tarkibida kvarsli diorit-dioritdan mayda donador trond'emit, plagiogranit va aplitsimon granitgacha bo'lgan to'rtta faza hamda to'rt impulsli dayka majmuasi ajratildi.

Massivning gipabissal darajasi aplit-pegmatitlarning kamligi, plagioklazning barqaror zonalligi, rogoviklarning keng rivojlanishi, kaliyli metasomatoz belgilarining yo'qligi va yuqori magnitlanuvchanlik ($400\text{--}3700 \cdot 10^{-6}$ SGS birlik) bilan tasdiqlanadi. Kontakt oreolida skapolit-

piroksenli rogoviklar (0,1–2,5 km) va granat-piroksenli skarnlar (10–130 m) rivojlangan.

Ma'dan mineralizatsiyasi besh etapli paragenetik ketma-ketlikni hosil qiladi va uch a'zoli metasomatik zonallik (ichki magnetitli, o'rta molibdenit-xalkopiritli va tashqi galenit-sfalerit-xalkopiritli) bilan ifodalanadi. Bu Bokali ma'dan-magmatik tizimini mis-molibden formatsiyasining skarn-porfir turiga kiritish imkonini beradi.

Erozion kesim koeffitsiyenti $K_e = 0,2$ bo'lgani holda, hozirgi ochilma ma'danlashgan zonaning o'rta qismidan pastda joylashgan. Shu bois qidiruvni intruziv kontaktining ichki tomoniga va oksidlanmagan chuqur gorizontlarga yo'naltirish lozim: birinchi navbatda Cu-Mo-Au-As anomaliali kvars-shtokverk va skarn zonalarining intruziv tomonga davomi, so'ngra Mo-W-Re anomaliali tonalit-aplit-pegmatit kontaktlari burg'ilanishi maqsadga muvofiq. Molibdenitdagi reniyni mikrozon tahlilida aniqlash va kechki fazalar uchun sirkon bo'yicha U-Pb yoshini olish keyingi tadqiqotlarning ustuvor yo'nalishidir.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Бухарин, А. К., Масленникова, И. А., & Пятков, А. К. (1985). Домезозойские структурно-формационные зоны Западного Тянь-Шаня. Фан.
- [2] Изох, Э. П., & Юдалевич, З. А. (1975). Формационное расчленение гранитоидов Западного Узбекистана. Наука.
- [3] Мухин, П. А., Каримов, Х. К., & Савчук, Ю. С. (1991). Палеозойская геодинамика Кызылкумов. Фан.
- [4] Крилов, А. Б. (1988). Кольцевые структуры гор Букантау (с. 56–66). Фан.
- [5] Кривцов, А. И. (1983). Геологические основы прогнозирования и поисков медно-порфировых месторождений. Недра.
- [6] Барсуков, В. Л., Григорян, С. В., & Овчинников, Л. Н. (1981). Геохимические методы поисков рудных месторождений. Наука.
- [7] Беус, А. А., & Григорян, С. В. (1975). Геохимические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. Недра.
- [8] Локалов, В. Т., Хрущев, Н. А., Макаров, А. И., и др. (1964). Поиски, разведка и оценка месторождений молибдена. Недра.
- [9] Sillitoe, R. H. (2010). Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1), 3–41.
- [10] Meinert, L. D., Dipple, G. M., & Nicolescu, S. (2005). World skarn deposits. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 299–336.
- [11] Seltmann, R., Konopelko, D., Biske, G., Divaev, F., & Sergeev, S. (2011). Hercynian post-collisional magmatism in the context of Paleozoic magmatic evolution of the Tien Shan orogenic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5), 821–838.

- [12] Карабаев, М. С. (2016). Геохимические поисково-оценочные критерии золото-редкометалльного оруденения гор Букантау. ЎзМУ хабарлари, (3/1), 150–153.
- [13] Хайдаров, Б. Х., Юсупов, В. Р., & Юсупов, Р. Ю. (2022). Анализ результатов геофизических работ в районе Восточного, Южного и Северного Букантау (Узбекистан). Геофизические исследования, 23(3), 68–85.
- [14] Исаходжаев, Б. А., Тангиров, А. И., & Урунов, Б. Н. (2010). Эндогенные рудные месторождения гор Букантау, закономерности размещения и перспективы. Рудно-магматические системы орогенных областей, 168–171.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Rahmatullayev, I. F., & Ashirbekov, A. B. (2026). Bokali intruzivi petrografiya va ma'dandorligi (Shimoliy Bukantov). Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.17>

UO'K: 550.34:550.834(575.1)

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.18

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

TOSHKENT SHAHRINING SEYSMIK JADALLIGINING CHUQURLIK BO'YICHA O'ZGARISHINI BAHOLASH



Islamova Nilufar Fayzullayevna

O'zR FA G'. O. Mavlonov nomidagi Seysmologiya instituti katta ilmiy xodimi, Toshkent, O'zbekiston

E-mail: nilufarfayz1987@gmail.com

ORCID ID: 0009-0002-3836-4873

Science ID: MTV-0525-0073

Annotatsiya. Maqolada Toshkent shahri hududi bo'ylab muhandis-geologik tadqiqotlar, seysmik tadqiqotlarda MASW usuli profillari hamda instrumental-seysmometrik tadqiqotlarda mikroseysmik tebranishlarning spektral nisbatini aniqlash uchun qo'llanilgan HVSR usuli natijalari asosida hisoblashlar uchun umumlashtirilgan seysmogeologik modellar ishlab chiqilgani bayon etilgan. Mazkur ma'lumotlar grunt qatlamlarining geologik tuzilishi, fizik-mexanik va dinamik xususiyatlarini kompleks baholash asosida tadqiqot hududi bo'yicha turli chuqurliklarda seysmogeologik grunt modellarini shakllantirish imkonini berdi. Natijada yer osti makonini o'zlashtirishda xalqaro standartlarga mos ravishda grunt qatlamlarining seysmik reaksiyasi modellashtirildi hamda yer osti muhitining turli hisobiy chuqurliklarida hosil bo'ladigan maksimal grunt tezlanishi (PGA) qiymatlari asosida mahalliy mutaxassislar uchun seysmik ta'sir va seysmik jadallik (ball) xaritalari ishlab chiqildi.

Kalit so'zlar: muhandis-geologik sharoit, seysmik ta'sir, maksimal grunt tezlanishi (PGA), seysmik jadallik, seysmik to'lqinlar, grunt qatlami.

Received: 17.08.2026

Accepted: 31.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ГОРОДА ТАШКЕНТА ПО ГЛУБИНЕ

Исламова Нилуфар Файзуллаевна

Старший научный сотрудник Института сейсмологии имени Г. О. Мавлонова Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В статье описывается разработка обобщенных сейсмогеологических моделей для расчетов на основе результатов инженерно-геологических изысканий, профилей, полученных методом MASW по данным сейсмических исследований, и метода HVSR для определения спектрального отношения микросейсмических колебаний по данным инструментально-сейсмометрических исследований. На основе этих данных были сформированы сейсмогеологические модели грунтов на разных глубинах исследуемой территории на основе комплексной оценки геологической структуры, физико-механических и динамических свойств грунтовых слоев. В результате при разработке подземного пространства было выполнено моделирование сейсмического отклика грунтовых слоев в соответствии с международными стандартами, а также разработаны карты сейсмической интенсивности (в баллах) для местных специалистов на основе значений максимального ускорения грунта (PGA), генерируе -

мых на глубинах 10, 20 и 30 м подземной среды, и оценки сейсмического воздействия.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия, сейсмическое воздействие, максимальное ускорение грунта (PGA), сейсмическая интенсивность, сейсмические волны, грунтовый слой.

ASSESSMENT OF THE DEPTH-DEPENDENT VARIATION IN SEISMIC INTENSITY OF THE CITY OF TASHKENT

Islamova Nilufar Fayzullaevna

Senior Researcher at the G. O. Mavlyanov Institute of Seismology of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. The article describes the development of generalized seismogeological models for calculations based on the results of engineering-geological surveys, MASW method profiles from seismic surveys, and the HVSr method for determining the spectral ratio of microseismic vibrations from instrumental-seismometric surveys. Based on these data, seismogeological soil models were formed at different depths in the study area through a comprehensive assessment of the geological structure and the physical-mechanical and dynamic properties of soil layers. As a result, the seismic response of soil layers was modeled in accordance with international standards for the development of underground space, and seismic intensity maps (in scores) were developed for local specialists based on the maximum ground acceleration (PGA) values generated at different calculated depths of the underground environment, as well as seismic impact.

Keywords: engineering-geological conditions, seismic impact, maximum ground acceleration (PGA), seismic intensity, seismic waves, soil layer.

Kirish. Toshkent–Golodnostep doirasida eng xavfli seysmogen struktura sifatida Toshkentoldi fleksura-uzilish zonasi ajratib ko'rsatiladi. Ushbu zonaning ko'tarilgan qanotida Poltorasko–Sirdaryo antiklinal zonasiga xos yosh qatlanmalar jadal shakllanib borsa, pastga tushgan qanotida Chirchiq–Golodnostep sinklinal zonasi rivojlanadi. Hozirgi vaqtda aynan shu zonaga besh, olti va yetti ballli zilzilalar epitsentrlari bog'liq ekani qayd etilgan [1].

Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi Toshkent shahri hududida yer osti makonini o'zlashtirish sharoitida grunt qatlamlarining seysmik reaksiyasini modellashtirish hamda yer osti muhitining turli hisobiy chuqurliklarida hosil bo'ladigan maksimal grunt tezlanishi (PGA) qiymatlarini aniqlashdan iborat.

Tadqiqot metodologiyasi. Toshkent shahri hududi bo'ylab muhandis-geologik tadqiqotlar, seysmik tadqiqotlarda MASW usuli profillari hamda seysmometrik tadqiqotlarda mikroseysmik tebranishlarning spektral nisbatini aniqlash uchun qo'llanilgan HVSr usuli natijalari asosida hisoblashlar uchun umumlashtirilgan seysmogeologik modellar ishlab chiqildi. Mazkur ma'lumotlar grunt qatlamlarining geologik tuzilishi, fizik-mexanik va dinamik xususiyatlarini kompleks baholash imkonini berdi. Tadqiqot hududi bo'yicha

turli chuqurliklarda jami 2184 ta, ya'ni har bir chuqurlik uchun 728 tadan seysmogeologik grunt modeli shakllantirildi.

Yer osti makonini o'zlashtirish jarayonida seysmik ta'sirlarni ishonchli baholash muhandis-geologik sharoitlarni har tomonlama o'rganish, grunt qatlamlarining fizik-mexanik va dinamik xususiyatlarini aniqlash hamda ularning seysmik ta'sir ostidagi xatti-harakatini modellashtirishni talab etadi. Shu maqsadda tadqiqotda qatlamli grunt muhitida seysmik to'lqinlarning tarqalishini modellashtirish uchun STRATA (Stratified Response Analysis) dasturidan foydalanildi.

STRATA dasturi qatlamli grunt muhitida seysmik to'lqinlarning vertikal yo'nalishda tarqalishini bir o'lchamli (1D) to'lqin tarqalishi nazariyasiga asoslangan holda hisoblaydi. Dastur grunt qatlamlarining amplituda-chastota tavsiflari, rezonans xususiyatlari, javob spektrlari hamda maksimal grunt tezlanishi (Peak Ground Acceleration – PGA) kabi muhim seysmik parametrlarni aniqlash imkonini beradi. Shu bilan birga, dastur grunt qatlamlarining dinamik javobini baholash, seysmik to'lqinlarning kuchayishi yoki so'nish qonuniyatlarini aniqlash hamda turli muhandis-geologik sharoitlarda yer osti inshootlariga ta'sir etuvchi seysmik yuklamalarni baholash

uchun samarali vosita hisoblanadi.

Hisoblashlarning dastlabki bosqichida mavjud muhandislik-geologik va geofizik ma'lumotlar tahlil qilinib, har bir kuzatuv nuqtasi uchun qatlamlari grunt muhitining seysmogeologik modeli tuzildi. Modellarni yaratishda grunt qatlamlarining seysmik ta'sirga javobini tavsiflovchi quyidagi asosiy parametrlar hisobga olindi. Natijada 10, 20 va 30 m chuqurliklar uchun PGA ning fazoviy taqsimot xaritalari shakllantirildi.

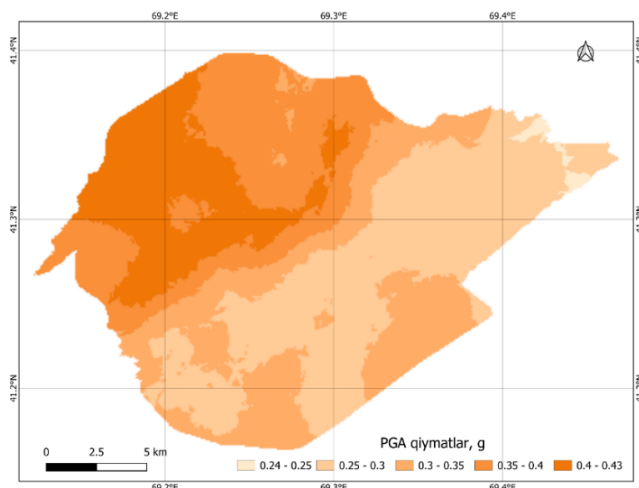
Ushbu xaritalar yer yuzasi uchun qabul qilingan hisobiy seysmik ta'sirning yer osti muhitida qanday o'zgarishini ko'rsatadi. Model-lashtirish natijalariga ko'ra, yuzaga yaqin bo'shoq grunt qatlamlarida PGA qiymatlari nisbatan yuqori bo'lib, chuqurlik ortishi bilan gruntni dinamik qattiqligi oshishi va deformatsiyalanuvchanligi kamayishi hisobiga seysmik tevlanish qiymatlarida pasayish tendensiyasi kuzatiladi. Biroq ayrim uchastkalarda qatlamlar orasidagi impedans kontrasti, suvga to'yingan gruntni yoki lokal rezonans xususiyatlari sababli ma'lum chuqurliklarda PGA qiymatlarining qayta ortishi ham ehtimoldan xoli emas.

PGA xaritalari GIS muhitida geostatistik interpolatsiya usullari asosida shakllantiriladi. Bunda har bir nuqtaning koordinatasi, chuqurlik bo'yicha hisoblangan PGA qiymati, grunt turi va Vs profili ma'lumotlari yagona ma'lumotlar bazasiga birlashtiriladi. Interpolatsiya natijasida Toshkent shahri hududi bo'yicha har bir chuqurlik uchun seysmik tevlanishning uzluksiz fazoviy maydoni hosil qilinadi. Bu maydonlar keyinchalik makro-seysmik intensivlikka o'tkazilib, yer osti obyektlarini seysmik jihatdan asoslangan holda loyihalashda foydalaniladi.

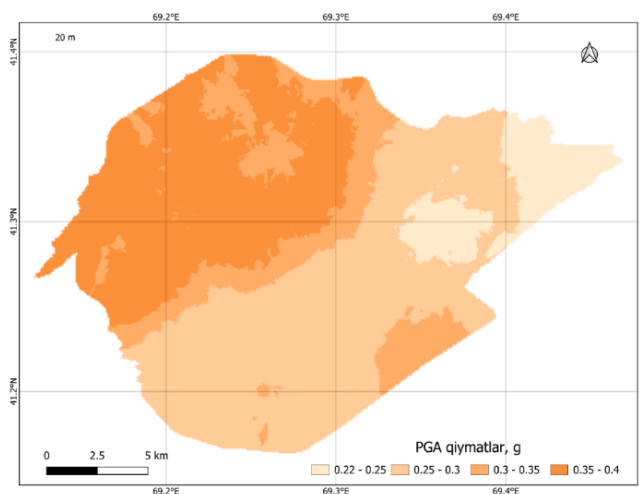
Tahlil va natijalar. Tadqiqot natijalariga ko'ra, yer yuzasidagi gruntni chuqurlik bo'yicha tevlanishi (PGA) 0,23–0,50 g oralig'ida, 10, 20 va 30 m chuqurliklarda esa PGA 0,20–0,40 g atrofida bo'ldi. Ushbu tevlanishlar Toshkent shahrining grunt sharoitida seysmik to'liqlar tevlanishining kuchayishi yoki so'nishi xususiyatlarini baholashga xizmat qildi. Chuqurlik bo'yicha o'zgarish tendensiyalariga ko'ra, chuqurlik ortgani sari tevlanish kamayadi, biroq bu o'zgarishlar turlicha xarakterga ega: yer yuzasida – 0,37 g, 10 m chuqurlikda – 0,27 g, 20 m chuqurlikda – 0,23 g va 30 m chuqurlikda – 0,25 g. Boshqa profilda esa qiymatlar 0,36 → 0,30

→ 0,28 → 0,26 ko'rinishida o'zgargan. Ushbu holatda bo'shoq grunt qatlamlarining xususiy tevlanish chastotasi ortib, chuqurlashgan sari zichlashgan, nisbatan asosiy qatlamlarga o'tilganda amplituda asta-sekin pasayadi. Shahar hududining grunt sharoitida 10 m chuqurlikdagi PGA natijalari yer yuzasidagi natijalarga deyarli teng yoki ulardan biroz yuqori bo'lgan holatlar ham kuzatildi: 0,39 → 0,39 → 0,32 → 0,32 g yoki 0,47 → 0,48 → 0,42 → 0,36 g.

Odatda, bu holat yer yuzasidan 5–10 m oraliqda joylashgan ancha bo'shoq hamda yer osti grunt suvlari sathi 10 m gacha bo'lgan qatlamlarga xos xususiyatdir (1-rasm).



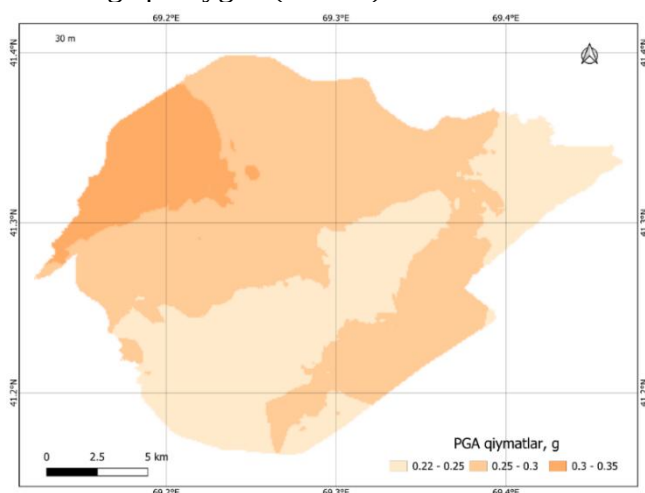
1-rasm. Toshkent shahri hududi bo'yicha 10 m chuqurlikdagi gruntni chuqurlik bo'yicha tevlanishi (PGA) xaritasi.



2-rasm. Toshkent shahri hududi bo'yicha 20 m chuqurlikdagi gruntni chuqurlik bo'yicha tevlanishi (PGA) xaritasi.

Yer yuzasidan 10 m gacha bo'lgan deformatsiyaga moyil qatlamdan farqli o'laroq, 10–20 m chuqurliklarda gruntlarning cho'qqi tezlanishi (PGA) asta-sekin so'nish zonasiga o'tishni boshlaydi. Ya'ni, bu qatlamlar nisbatan zich, yirik donador va mustahkam gruntlardan tashkil topgan bo'lib, amplitudaning pasayishi, nisbatan barqaror spektr va pastroq gorizontalar deformatsiyalar bilan tavsiflanadi. PGA o'rtacha 15–30% ga kamaygan, ayrim lokal nuqtalarda esa bu farq 35% gacha yetgan (2-rasm).

Toshkent shahrida 20–30 m chuqurlikdagi gruntlar zich qum-shag'al, suglinok va zichlashgan toshsimon lyosslardan tarkib topgan bo'lib, dinamik jihatdan barqarordir. PGA qiymatlari asosan 0,21–0,33 g oralig'ida bo'lib, yuza qatlamlariga nisbatan 25–40% ga pasaygan (3-rasm).



3-rasm. Toshkent shahri hududi bo'yicha 30 m chuqurlikdagi gruntlarning cho'qqi tezlanishi (PGA) xaritasi.

Shuningdek, seysmik ta'sirni baholash seysmik jadallikning balli bahosi, grunt tebranishlarining cho'qqi tezlanishi parametrlari, inshootlarning joylashish chuqurligi hamda muhandis-geologik va tektonik sharoitlarni hisobga oluvchi tuzatish koeffitsientlarini kompleks qo'llash asosida amalga oshirildi.

Tadqiqot davomida xalqaro standartlarga mos ravishda Toshkent shahri hududi bo'yicha chuqurlikdagi gruntlarning cho'qqi tezlanishi (PGA) xaritalari bilan birgalikda, mahalliy mutaxassislar uchun shahar yer osti makonini o'zlashtirishda seysmik ta'sir jadalligini miqdoriy baholash maqsadida Toshkent shahri hududining seysmik

jadallik (ball) xaritalari ishlab chiqildi.

Turli energiya darajasidagi zilzilalar uchun masofaga bog'liq holda grunt tebranishlarining maksimal tezlanish qiymatlari so'nishini ifodalovchi gibril so'nish tenglamasini tuzishda zilzila magnitudasi oshishi bilan seysmik ta'sir darajasining ortishi va grunt sharoitlariga mos ravishda o'zgarishi, amax qiymatlarining o'sishi kabi tabiiy qonuniyatlar bilan bir qatorda, so'nggi yillarda Markaziy Osiyo, jumladan, O'zbekiston hududida seysmik xavfni baholash bo'yicha tadqiqotlar olib borgan mutaxassis-mualliflarning ekspert baholariga, xususan, Ibragimov R. S. va boshqalarning [2] baholariga tayanildi.

Seysmik ta'sir jadalligini miqdoriy baholash uchun ushbu ishda grunt tebranishlarining cho'qqi tezlanishi bilan seysmik intensivlikning balli qiymati o'rtasidagi bog'liqlikni ifodalovchi empirik tenglama qo'llanildi:

$$I = \log_2 \frac{a_{\max}}{100} + 6.5 \quad (1)$$

bu yerda:

I – MSK-64 shkalasi bo'yicha ballarda ifodalangan seysmik jadallik;

$a_{\max}$ – grunt tebranishlarining cho'qqi tezlanishi bo'lib, sm/s^2 da ifodalanadi.

Mazkur formula seysmik jadallikning grunt tebranishlari tezlanish amplitudasiga bog'liqligining logarifmik xususiyatlaridan kelib chiqqan. Bu holat seysmik jarayonlarning fizik tabiatiga hamda injener-seysmologiyada intensivlik shkalalarini talqin qilishda qabul qilingan yondashuvlarga mos keladi. Logarifmning 2 asosida olinishi grunt tebranishlarining cho'qqi tezlanishi ikki barobar oshganda, seysmik jadallik qiymati taxminan bir ballga oshishini anglatadi.

$a_{\max}$ qiymati seysmik to'liqlar tarqalishi jarayonida grunt massivida yuzaga keladigan inersion ta'sirning eng yuqori darajasini tavsiflaydi va seysmik xavfni baholash hamda inshootlarni loyihalashda asosiy hisobiy parametrlardan biri hisoblanadi. Tezlanish qiymatining 100 ga bo'linishi empirik bog'liqliklarda qabul qilingan o'lchov shkalasiga moslashtirish zarurati bilan izohlanadi va hisoblangan intensivlik qiymatlarining kuzatilgan makroseysmik ta'sirlar bilan muvofiqligini ta'minlaydi.

Tenglamadagi doimiy 6,5 qiymati hisobiy jadallik qiymatlari bilan MSK-64 shkalasi asosida

makroseysmik kuzatuvlar orqali aniqlangan balli baholar o'rtasidagi muvofiqlikni ta'minlovchi kalibrovka koeffitsienti hisoblanadi. Ushbu koeffitsient zilzilalar bo'yicha ma'lumotlarni statistik qayta ishlash natijasida olingan bo'lib, injener-seysmologik hisob-kitoblarda keng qo'llaniladi.

Keltirilgan formula grunt tebranishlarining cho'qqi tezlanishi parametri asosida seysmik jadallikni baholash talab etilgan hollarda qo'llaniladi. Ushbu parametr injener-seysmologik hisob-kitoblar, qiymatli modellashirish yoki zilzilalarning instrumental yozuvlarini tahlil qilish natijasida aniqlanadi.

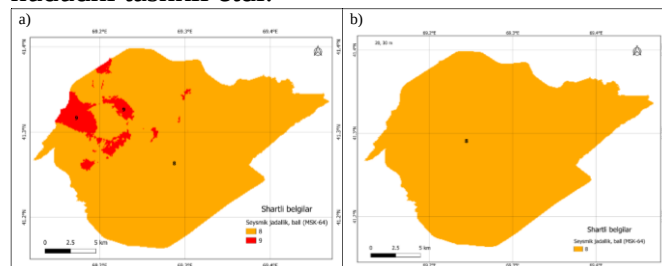
Mazkur bog'liqlikdan kelib chiqqan holda, mahalliy mutaxassislar uchun hisoblangan tezlanish qiymatlaridan MSK-64 va EMS-98 shkalalarida qabul qilingan seysmik jadallikning balli bahosiga o'tishda samarali hisoblanadi hamda hisob-kitob natijalarining me'yoriy talablar bilan taqqoslanishini ta'minlaydi.

Grunt tebranishlarining cho'qqi tezlanishi bilan seysmik jadallik o'rtasidagi logarifmik bog'liqlikdan foydalanish jadallik shkalalarining absolyut dinamik parametrlarni emas, balki ularning inshootlar va tabiiy muhitga nisbatan ko'rsatadigan nisbiy ta'sirini aks ettirishi bilan izohlanadi. Shu ma'noda I parametri tebranishlarning dinamik xususiyatlari va ularning ehtimoliy makroseysmik namoyon bo'lishlarini birlashtiruvchi, seysmik ta'sirni ifodalovchi umimlashtirilgan ko'rsatkich sifatida qaraladi.

Yuqorida qayd etilgan bog'liqlikdan kelib chiqqan holda, Toshkent shahrining yer osti shaharsozlik bosh rejasi uchun chuqurliklar bo'yicha seysmik jadallik xaritalari ishlab chiqildi (4-rasm).

Ushbu xarita Toshkent shahri hududining yer osti makonidagi 10 m chuqurlikda aniqlangan seysmik jadallik qiymatlari asosida ishlab chiqilgan. Ushbu ma'lumotlar yer osti grunt qatlamlarining seysmik to'lqinlarni kuchaytirish yoki so'ndirish xususiyatlarini baholash imkonini beradi. Bu holat yer osti shaharsozligida yuqori 10 metrli qatlamni hisobga olmagan holda grunt qatlamining seysmikligini aks ettiradi. To'kma, suglinok, supes hamda lyossimon, ya'ni dispers qatlamlarda seysmik to'lqinlarni kuchaytirish xususiyati mavjudligini ko'rsatadi. 20 va 30 m chuqurliklarda bo'shoq qatlam o'rnini asosiy qoyatosh grunt qatlami egallagani hisobiga seysmik jadallik 8 balli

hududni tashkil etdi.



4-rasm. Toshkent shahrining seysmik jadallik (I) xaritalari:

a) 10 m chuqurlikdagi; b) 20–30 m chuqurlikdagi.

Xulosa va tavsiyalar. Xulosa qilib aytganda, chuqurliklar bo'yicha PGA parametrlari asosida xaritalash Toshkent shahri uchun uch o'lchamli seysmik jadallik modelini yaratishga xizmat qiladi. Bu yondashuv seysmik mikrohududlashtirishni faqat yer yuzasi bilan cheklamay, vertikal kesim bo'yicha ham baholash imkonini beradi. Natijada yer osti infratuzilmalarini seysmik jihatdan xavfsiz, iqtisodiy asoslangan va muhandislik nuqtayi nazaridan ishonchli loyihalash uchun zarur bo'lgan ilmiy-amaliy asos shakllandi.

Mazkur xaritalarning amaliy ahamiyati shundaki, ular yer osti inshootlari joylashgan haqiqiy chuqurlikdagi seysmik ta'sirni aniqlash imkonini beradi. Masalan, yer yuzasida yuqori PGA kuzatilgan hududda 30 m chuqurlikda seysmik ta'sir kamayishi mumkin yoki, aksincha, litologik kesimda keskin impedans kontrasti mavjud bo'lsa, ma'lum chuqurlikda lokal kuchaytirish kuzatilishi mumkin. Shuning uchun metro tonnellari, yer osti avtoturargohlari, kommunikatsiya kollektorlari va maxsus muhandislik obyektlari uchun yagona yuza PGA qiymatini qabul qilish yetarli emas. Har bir obyekt uchun uning loyihaviy chuqurligiga mos PGA xaritasi asosida hisobiy seysmik ta'sir belgilanishi lozim.

Toshkent shahri hududida seysmik jadallikning chuqurlik bo'yicha o'zgarishi, asosan, shu chuqurlikdagi gruntlarning ko'ndalang to'lqin tezligi o'zgarishiga bog'liq holda baholanadi va u gruntlarning tipiga, g'ovakligiga hamda zichligiga qarab 1 ballgacha oshadi.

Toshkent shahrining 10 m chuqurlikdagi seysmik jadalligi grunt tiplari va seysmik to'lqin tezliklari qiymatlariga qarab PGA bo'yicha 0,24 dan 0,43 g gacha, makroseysmik ballarda esa 8 va 9 balli zonalarni tashkil etishi aniqlandi. 20 m chuqurlikda

seysmik jadallik PGA bo'yicha 0,22 dan 0,4 g gacha, 30 m chuqurlikda esa 0,22 dan 0,35 g gacha bo'lishi aniqlandi. Bu chuqurliklarda makroseysmik ballar bo'yicha hudud 8 ballni tashkil qiladi.

Toshkent shahri uchun tuzilgan 10, 20 va 30 m chuqurlikdagi seysmik jadallik xaritalari yetarli muhandislik-geologik va geofizik ma'lumotlar

bazasiga ega. Ya'ni, ular 728 punktdagi seysmik tadqiqotlar va instrumental-seysmometrik, shuningdek, 123 punktdagi muhandislik-geologik ma'lumotlarga asoslangan. Shu sababli ushbu xaritalar Toshkent shahrida yer osti makonini o'zlashtirishda me'yoriy hujjat sifatida qabul qilinishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Ибрагимов, Р. Н., Нурматов, У. О., & Ибрагимов, О. Р. (2002). Сейсмоструктурный метод оценки сейсмической опасности и вопросы сейсмического районирования. In К. Н. Абдуллабеков (Ed.), Сейсмическое районирование и прогноз землетрясений в Узбекистане (pp. 59–74). ГП «Институт ГИДРОИНГЕО».
- [2] Ibragimov, R. S., Ibragimova, T. L., Mirzaev, M. A., & Ashurov, S. H. (2022). Comparison of seismic hazard assessments obtained within the probabilistic and probabilistic-deterministic approaches for the territory of Uzbekistan. *Seismic Instruments*, 58(7).
- [3] Исмаилов, В. А., Исламова, Н. Ф., & Тешаева, Р. Б. (2019). О новой версии классификации грунтов по сейсмическим свойствам. *Наука и инновационные развитие*, (6), 58–68.
- [4] Исмаилов, В. А., и др. (2023). Сейсмическое микрорайонирование г. Ташкент в масштабе 1:25 000. Институт сейсмологии.
- [5] Teshayeva, R. B., & Islamova, N. F. (2023). Development of seismic models of soil conditions for seismic microzoning of cities in Uzbekistan (in engineering terms). *International Journal of Geology, Earth & Environmental Sciences*, 13, 92–99. <http://www.cibtech.org/jgee.htm>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Islamova, N. F. (2026). Toshkent shahrining seysmik jadalligining chuqurlik bo'yicha o'zgarishini baholash. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.18>

UO‘K: 628.35:665.6

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.15

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

NEFT KONLARIDA FOYDALANILADIGAN TEXNIK SUVNI TOZALASHDA SORBSION-FLOTATSION JARAYONLAR KINETIKASI VA TEXNOLOGIK PARAMETRLARINI OPTIMALLASHTIRISHNING ILMIY ASOSLARI



**Tangirov Jasurbek Mixli
o'g'li**

*Texnika fanlari bo'yicha falsafa
doktori (PhD), Toshkent davlat
texnika universiteti, Toshkent,
O'zbekiston*

E-mail:

jasurtangirov0895@gmail.com
ORCID ID: 0009-0002-3624-8852
Science ID: FQD-0826-0067



**Xabibullayev Saidaziz
Shoxsuvorovich**

*Texnika fanlari bo'yicha falsafa
doktori (PhD), dotsent, Toshkent
davlat texnika universiteti, Toshkent,
O'zbekiston*

E-mail:

saidazizxonhabibullayev@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4948-9885
Science ID: FTN-0326-0044



**Amirqulov Nuritdin
Sayfullayevich**

*Texnika fanlari nomzodi, professor,
Toshkent davlat texnika universiteti,
Toshkent, O'zbekiston*

E-mail:

NuritdinAmirqulov1964@gmail.com
ORCID ID: 0009-0003-6955-0860
Science ID: FSD-0626-0090



**Muradullayev Doston
Muzaffar o'g'li**

*Stajor-o'qituvchi, Qarshi davlat
texnika universiteti, Qarshi,
O'zbekiston*

E-mail:

muradullayevdoston2@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-3381-1201
Science ID: FQD-0726-0261

Annotatsiya. Maqolada neft konlarida ishlatiladigan texnik suvni tozalash muammosi ko'rib chiqilgan bo'lib, unda neft mahsulotlari va mexanik aralashmalarni bir vaqtning o'zida yo'qotish maqsadida sorbsiya va mikropufakchali flotatsiya jarayonlari yagona texnologik yechim sifatida birlashtirilgan. Tadqiqotda flotatsiya bosqichi birinchi tartibli, sorbsiya jarayoni esa psevd-ikkinchi tartibli kinetik tenglamalar orqali tavsiflanib, ikkala jarayonni bog'lovchi umumlashtirilgan massa balans modelini taklif etilgan. Havoning sarfi, reagent konsentratsiyasi va kontakt vaqti kabi asosiy texnologik omillar javob sirti usuli yordamida optimallashtirilgan. Mavjud tajriba natijalarini qayta tahlil qilish orqali pufakcha o'lchami, ion kuchi va sorbent qatlami parametrlarining tozalash samaradorligiga ta'siri miqdoriy baholangan. Olingan natijalar sanoat sharoitida energiya va reagent sarfini minimal darajaga tushirish bilan birga yuqori tozalash darajasiga erishish imkonini beruvchi optimal texnologik rejimni aniqlashga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: neftli oqova suv, sorbsiya, flotatsiya, mikropufakcha, bentonit, Fe_3O_4 , kinetika, javob sirti usuli, optimallashtirish, mexanik aralashmalar.

Received: 10.08.2026

Accepted: 29.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КИНЕТИКИ СОРБЦИОННО-ФЛОТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОЧИСТКЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Тангиров Жасурбек
Михли угли

Доктор философии по
техническим наукам (PhD),
Ташкентский государственный
технический университет,
Ташкент, Узбекистан

Хабибуллаев Саидазиз
Шохсусорович

Доктор философии по
техническим наукам (PhD),
доцент, Ташкентский
государственный технический
университет, Ташкент,
Узбекистан

Амиркулов Нуритдин
Сайфуллаевич

Кандидат технических наук,
профессор, Ташкентский
государственный технический
университет, Ташкент,
Узбекистан

Мурадуллаев Достон
Музаффар угли

Стажёр-преподаватель,
Каршинский государственный
технический университет,
Карши, Узбекистан

Аннотация. В статье рассматривается проблема очистки технической воды, используемой на нефтяных месторождениях, в рамках которой процессы сорбции и микропузырьковой флотации объединены в единое технологическое решение с целью одновременного удаления нефтепродуктов и механических примесей. В исследовании стадия флотации описана кинетическим уравнением первого порядка, а процесс сорбции — псевдо-второго порядка, при этом предложена обобщённая модель массового баланса, связывающая оба процесса. Основные технологические факторы, такие как расход воздуха, концентрация реагента и время контакта, оптимизированы с использованием метода поверхности отклика. Путём повторного анализа имеющихся экспериментальных данных количественно оценено влияние размера пузырьков, ионной силы и параметров слоя сорбента на эффективность очистки. Полученные результаты служат для определения оптимального технологического режима, позволяющего достичь высокой степени очистки при минимальных затратах энергии и реагентов в промышленных условиях.

Ключевые слова: нефтесодержащие сточные воды, сорбция, флотация, микропузырьки, бентонит, Fe_3O_4 , кинетика, метод поверхности отклика, оптимизация, механические примеси.

SCIENTIFIC FOUNDATIONS OF THE KINETICS OF SORPTION- FLOTATION PROCESSES AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR THE PURIFICATION OF TECHNICAL WATER USED IN OIL FIELDS

Tangirov Jasurbek
Mikhli ugli

Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Tashkent State
Technical University, Tashkent,
Uzbekistan

Khabibullayev Saidaziz
Shokhsuvorovich

Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Associate
Professor, Tashkent State Technical
University, Tashkent, Uzbekistan

Amirqulov Nuritdin
Sayfullayevich

Candidate of Technical Sciences,
Professor, Tashkent State Technical
University, Tashkent, Uzbekistan

Muradullayev Doston
Muzaffar ugli

Trainee Lecturer, Karshi State
Technical University, Karshi,
Uzbekistan

Abstract. The article addresses the problem of purifying technical water used in oil fields, in which sorption and microbubble flotation processes are combined into a unified technological solution aimed at simultaneously removing petroleum products and mechanical impurities. In the study, the flotation stage is described by a first-order kinetic equation, while the sorption process is described by a pseudo-second-order equation, and a generalized mass balance model linking both processes is proposed. Key technological factors such as air flow rate, reagent concentration, and contact time are optimized using the response surface methodology. Through a re-analysis of existing experimental data, the effects of bubble size, ionic strength, and sorbent layer parameters on purification efficiency are quantitatively assessed. The obtained results serve to determine the optimal technological regime that ensures a high degree of purification while minimizing energy and reagent consumption under industrial conditions.

Keywords: oily wastewater, sorption, flotation, microbubbles, bentonite, Fe_3O_4 , kinetics, response surface methodology, optimization, mechanical impurities.

Kirish. Neft qazib olish, tashish va qayta | dispers va emulsiyalangan uglevodorodlar bilan
ishlashda foydalaniladigan texnik suvda erkin, | birga qum, korroziya mahsulotlari uchraydi.

Emulsiya tomchilari kichrayganda Stoks bo'yicha ko'tarilish tezligi keskin kamayadi, shu sababli gravitatsion tindirish ko'p fazali texnik suv uchun yetarli emas. Zamonaviy yechimlar koagulyatsiya-flokulyatsiya, sorbsiya, nanopufakchali flotatsiya va filtrlashni gibrid ketma-ketlikda qo'llashga yo'naltirilgan [1–5].

Nanopufakchalar katta sirt/hajm nisbati va past ko'tarilish tezligi sababli neft tomchisi-pufakcha to'qnashuvi hamda birikish ehtimolini oshiradi [2,4,6]. Bunda (5,6–9,8) m³/h oralig'ida nanopufakchali qurilmada o'rtacha neft ajratish samaradorligi (59,92–79,40)% bo'lganini qayd etgan [2]. Sorbsiya bosqichida bentonit, modifikatsiyalangan bioasosli tolalar va magnit kompozitlarni qo'llash samarali hisoblanadi. Fe₃O₄/bentonit qatlamida Thomas va Yoon–Nelson modellari tajribani R²>0,95 bilan tavsiflagan [7]; modifikatsiyalangan bentonit neft mahsulotlari bilan birga mexanik aralashmalarni ham kamaytirgan [8]. Esterifikatsiyalangan kenaf o'zagida 76% neft ajratish va R²=0,94 bo'lgan kvadratik optimallashtirish modeli olingan [9].

Mavjud ishlarda flotatsiya va sorbsiya ko'pincha alohida baholanadi; havo sarfi, reagent konsentratsiyasi, sorbent miqdori va kontakt vaqtining o'zaro kompensatsiyalanuvchi ta'siri yagona kinetik mezon bilan yetarli ifodalanmagan. Shunday ekan, ko'p fazali neftli oqova suvda sorbsiya va flotatsiya tezliklarini birlashtirib, ortiqcha energiya va reagent sarfini cheklaydigan, sanoat masshtabiga ko'chiriladigan optimallashtirish mezonini shakllantirish dolzarb masala hisoblanadi.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Tadqiqot ikkilamchi eksperimental ma'lumotlarning miqdoriy sintezi va fizik-kimyoviy modellashga asoslandi. 2021–2025-yillarda tarkibida neft bo'lgan suvni nanopufakchali flotatsiya, Fe₃O₄ bentonit, modifikatsiyalangan bentonit va bioasosli sorbentlar yordamida tozalashga bag'ishlangan, tajriba sharoiti hamda miqdoriy javoblari ochiq berilgan ishlar tanlandi [10]. Flotatsiya bosqichida neft konsentratsiyasining kamayishi birinchi tartibli samarali tezlik bilan ifodalandi. Ushbu yaqinlashuv tomchi-pufakcha to'qnashuvi, birikish va yuzaga ko'tarilish jarayonlari k_f parametri (1) orqali ifodalanadi.

$$\frac{(dC_o)}{(dt)} = -k_f C_o \quad (1)$$

bu yerda: C_o — neft konsentratsiyasi, k_f — flotatsiyaning samarali tezlik doimiysi. k_f havo sarfi Q_a, pufakcha diametri d_b, reagent konsentratsiyasi C_r, ion kuchi va gidrodinamik rejimga bog'liq. Kamayuvchi chegaraviy samarani ifodalash uchun k_f quyidagi to'yinganlik funksiyasi ko'rinishida yozildi (2):

$$k_f = k_{(max)} \cdot \frac{Q_a}{K_Q + Q_a} \cdot \frac{C_r}{K_R + C_r} \cdot f(d_b) \quad (2)$$

Sorbsiya bosqichida yuzadagi faol markazlarning bosqichma-bosqich band bo'lishini tavsiflash uchun psevd-ikkinchi tartibli kinetik shakl tanlandi (3):

$$\frac{(dq_t)}{(dt)} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (3)$$

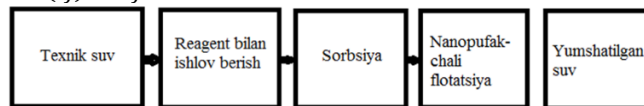
Sorbsiya va flotatsiya parallel yoki ketma-ket ta'sir qilganda suyuq fazadagi umumiy massa balansi quyidagicha yozildi:

$$\frac{(dC_o)}{(dt)} = -k_f C_o - \frac{(m_s)}{(V)k_2(q_e - q_t)^2} \quad (4)$$

bu yerda: m_s — sorbent massasi, V — suv hajmi, q_t va q_e — vaqt t dagi va muvozanatdagi sorbsiya sig'implari. (4)-tenglama sorbent yuzasida neftning to'planishi va hosil bo'lgan agregatlarning pufakcha bilan olib chiqilishini bir massa balansi doirasida ifodalaydi.

Optimallashtirish omillari: x₁ — havo sarfi, x₂ — reagent konsentratsiyasi, x₃ — kontakt vaqti. Javob Y neftni ajratish darajasi, zarur holatda muallaq moddalar bo'yicha ikkinchi javob bilan birgalikda baholanadi. Uch omilli RSM uchun ikkinchi darajali model:

$$Y = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i + \sum_i \beta_{(ii)} x_i^2 + \sum_{(i < j)} \beta_{(ij)} x_i x_j \quad (5)$$



1-rasm. Sorbsion-flotatsion tozalashning integrallashgan kinetik sxemasi.

Optimal rejim ko'p mezonli desirability bo'yicha tanlanadi: ajratish darajasi maksimal, havo va reagent sarfi minimal, kontakt vaqti esa apparat unumdorligini cheklamaydigan bo'lishi kerak. Shuning uchun optimal nuqta omillarning yuqori chegarasida emas, qo'shimcha resursga nisbatan samara o'sishi sekinlashadigan javob sirtining pastki qismida izlanadi. Quyida Sorbsion-flotatsion

tozalashning integrallashgan kinetik sxemasi (1-rasm) keltirilgan.

Natijalar. Tadqiqot natijalariga ko'ra to'rtta qonuniyat ishlab chiqildi: (1) pufakcha kichrayishi to'qnashuvni yaxshilaydi, lekin ortiqcha gaz yuklamasi koalesensiyani kuchaytiradi; (2) sorbsiya qatlamida oqim tezligi pasayishi kontakt vaqtini va q_e ni oshiradi; (3) boshlang'ich konsentratsiya ortishi sig'imni oshiradi, ammo yorib chiqishni tezlashtiradi; (4) sorbentni gidrofob modifikatsiyalash selektivlikni oshiradi, biroq maksimal reagent sarfi iqtisodiy optimal emas. Quyidagi 1-jadvalda texnik suvni tozalashda sorbsion-flotatsion jarayonlar kinetikasi va texnologik parametrlarini optimallashtirishning ilmiy asoslari keltirilgan.

1-jadval

Texnik suvni tozalashda sorbsion-flotatsion jarayonlar kinetikasi va texnologik parametrlarini optimallashtirishning ilmiy asoslari

Usul va sharoit	Haqiqiy natija	Texnologik talqin
Mikropufakchali flotatsiya; pH va NaCl ta'siri	Nanopufakcha samarasi yirikroq pufakchaga nisbatan 1,72 marta yuqori; pH≈3 da ~75%; 1 g/L NaCl da ~84%	Pufakcha o'lchami va ion kuchi birikish ehtimolini boshqaradi; tuzning ortiqcha dozasi samara pasayishiga olib keladi.
Modifikatsiyalangan bentonit; neftli oqova suv	20°C da neft mahsulotlari ajralishi (99,67–99,90)%; mexanik aralashmalar bo'yicha ~80% gacha	Sorbentning sirt xossalari yuqori ajratish beradi, biroq komponentlar bo'yicha kinetika bir xil emas.
Fe ₃ O ₄ /bentonit; Q=(3,0–3,8) mL/min; qatlam (2–4) cm	Q: q_e 129,14→88,10 mg/g; qatlam: q_e 93,71→121,25 mg/g; t_b 40→95 min	Oqim–kontakt vaqti va qatlam–faol markazlar o'rtasida muvozanat talab qilinadi.
Esterifikatsiyalangan kenaf; CCD/RSM	Optimal tajribada 76% neft ajratish; R ² =0,94	Gidrofob modifikatsiya samarali, lekin 1 soatlik ishlov iqtisodiy jihatdan yetarli deb topilgan.

Kenaf o'zagini stearin kislotasi bilan 1:0,5 nisbatda, 15% katalizator va 1 soat qizdirishda 76% neft ajratishga erishgan; xom kenafda 51% bo'lgan [9]. Nisbiy yaxshilanish 49,0% ni tashkil etadi, biroq modifikatsiya bosqichining o'zi ham iqtisodiy optimallashtirilishi kerak.

Muhokama. Natijalar sorbsion-flotatsion jarayon uchta ketma-ket qarshilik bilan boshqarilishini ko'rsatadi: neftning sorbent/agregat sirtiga massa ko'chishi, neft tomchisi–sorbent–pufakcha kompleksining hosil bo'lishi va kompleksning flotokonsentratga ko'tarilishi. Shu sababli (4)-tenglamadagi sorbsiya va flotatsiya

tezlik hadlari nisbatini texnologik rejimning asosiy kinetik mezoni sifatida qarash mumkin.

Kichik pufakchalarning soni va umumiy sirt maydoni ortib, ularning ko'tarilish tezligi kamayadi; bu neft tomchilari bilan to'qnashuv ehtimolini oshiradi. Biroq havo sarfi ortiqcha bo'lsa, turbulentlik va koalesensiya kuchayadi. Shu sababli (2)-tenglamadagi to'yinganlik shakli fizik ma'noga ega bo'lib, DAF/IGF tizimlari uchun «ko'proq havo — doimo yaxshiroq» yondashuvini rad etadi.

Sarran va hammualliflarning natijalarida oqim tezligi kamayganda q_e ning 46,6% ga ortishi diffuziya uchun ko'proq vaqt ajratilishi, qatlam balandligi oshganda esa faol markazlar va massa almashinish zonasi ko'payishi bilan izohlanadi. Yuqori boshlang'ich konsentratsiya q_e ni oshirgan bo'lsa-da, yorib chiqishning 73,7% ga tezlashishi q_e va t_b javoblarini birgalikda optimallashtirish zarurligini ko'rsatadi.

Xulosa. Sorbsiya va mikropufakchali flotatsiyani yagona kinetik tizim sifatida ko'rish ko'p fazali neftli oqova suvlarni tozalash uchun asosli: sorbsiya tomchi/agregat sirtini o'zgartiradi, flotatsiya esa hosil bo'lgan ifloslantiruvchi fazani tez ajratadi.

Nashr etilgan Fe₃O₄ bentonit ma'lumotlari qayta hisobida oqimni 3,8 dan 3,0 mL/min gacha kamaytirish q_e ni 46,6%, qatlamni 2 dan 4 cm gacha oshirish 29,4% ko'paytirdi; 200→1000 mg/L boshlang'ich konsentratsiya q_e ni 122,2% oshirgan holda yorib chiqish vaqtini 73,7% qisqartirdi.

Nanopufakcha o'lchami, ion kuchi, reagent miqdori va kontakt vaqti uchun maksimal emas, optimal oraliq mavjud. Shu bois sanoat rejimi tozalash talabini bajaradigan minimal yetarli havo va reagent sarfi hamda unumdorlikni cheklamaydigan kontakt vaqtiga asoslanishi kerak.

Ilmiy yangilik birinchi tartibli flotatsiya va psevdokkinchi tartibli sorbsiya kinetikasini yagona massa balansi orqali bog'lash hamda rejimni RSM/desirability mezonlari asosida tanlashdan iborat. Keyingi bosqichda model real neftni qayta ishlash oqova suvida CCD/RSM tajribasi orqali identifikatsiya qilinishi va sanoat sharoitida validatsiyadan o'tkazilishi zarur.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Wang, W., Zhao, X., Bai, X., Ma, X. L., Lin, W., & Yu, J. Y. (2024). Investigation of factors affecting oil-water separation efficiency in micro-bubble micro-cyclonic flow air flotation. *Journal of Water Process Engineering*, 67, 106094.
- [2] Liang, Y., et al. (2024). Oil-water separation process based on microbubble air flotation membrane device and scale-up research. *Desalination and Water Treatment*, 318, 100312.
- [3] Ding, G., Chen, J., Kong, X., Cai, X., Ji, Y., He, Q., & Wang, G. (2023). Structure design and industrial experiment of compact flotation unit for refinery wastewater treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, 194, 842–853.
- [4] Shen, W., et al. (2022). Microbubble and nanobubble-based gas flotation for oily wastewater treatment: A review. *Environmental Reviews*.
- [5] Piccioli, M., Aanesen, S. V., Zhao, H., Dudek, M., & Øye, G. (2020). Gas flotation of petroleum produced water: A review on status, challenges, and prospects. *Energy & Fuels*.
- [6] Li, Y., et al. (2025). Microbubbles enhance oil-in-water emulsion separation in fibrous coalescers. *Water Research*, 268, 122573.
- [7] Sarrañ, M. A., et al. (2024). Oily wastewater treatment by using Fe_3O_4 /bentonite in fixed-bed adsorption column. *ChemEngineering*, 8, 92.
- [8] Tleuova, S. T., Userbayeva, B. A., Tleuov, A. S., Yeskendiroya, M. M., Yakubova, R. R., & Kerimbayeva, K. Z. (2021). Kinetic study of oil-containing wastewater treatment with the use of natural sorbents. *Journal of Water and Land Development*, 49, 252–258.
- [9] Alias, N. H., Abdullah, L. C., Yaw, T. C. S., Jamil, S. N. A. M., Ting, T. M., Asis, A. J., Lee, C. L., & Adeyi, A. A. (2025). Esterification of Kenaf core fiber as a potential adsorbent for oil removal from palm oil mill effluent (POME). *Processes*, 13, 463.
- [10] Al-Dulaimi, S. L., & Al-Yaqoobi, A. M. (2021). Separation of oil/water emulsions by microbubble air flotation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1076, 012030.
- [11] Medeiros, A. D. L. M., et al. (2022). Oily wastewater treatment: Methods, challenges, and trends. *Processes*, 10, 743.
- [12] Ewis, D., Benamor, A., Ba-Abbad, M. M., Nasser, M., El-Naas, M., & Qiblawey, H. (2020). Removal of oil content from oil-water emulsions using iron oxide/bentonite nano adsorbents. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101583.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Tangirov, J. M., Xabibullayev, S. S., Amirq ulov, N. S., & Muradullayev, D. M. (2026). Neft konlarida foydalaniladigan texnik suvni tozalashda sorbsion-flotatsion jarayonlar kinetikasi va texnologik parametrlarini optimallashtirishning ilmiy asoslari. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.15>

UO‘K: 628.35

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.16

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

NEFT VA GAZ KORXONALARIDA TEXNIK SUVNI TOZALASH VA TAYYORLASH TEXNOLOGIYASI SAMARADORLIGINI OSHIRISHNING ILMIY ASOSLARI



**Tangirov Jasurbek Mixli
o'g'li**

*Texnika fanlari bo'yicha falsafa
doktori (PhD), Toshkent davlat
texnika universiteti, Toshkent,
O'zbekiston*

E-mail:

*jasurtangirov0895@gmail.com
ORCID ID: 0009-0002-3624-8852
Science ID: FQD-0826-0067*



**Xabibullayev Saidaziz
Shoxsuvorovich**

*Texnika fanlari bo'yicha falsafa
doktori (PhD), dotsent, Toshkent
davlat texnika universiteti, Toshkent,
O'zbekiston*

E-mail:

*saidazizxonhabibullayev@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4948-9885
Science ID: FTN-0326-0044*



**Amirqulov Nuritdin
Sayfullayevich**

*Texnika fanlari nomzodi, professor,
Toshkent davlat texnika universiteti,
Toshkent, O'zbekiston*

E-mail:

*NuritdinAmirqulov1964@gmail.com
ORCID ID: 0009-0003-6955-0860
Science ID: FSD-0626-0090*



**Muradullayev Doston
Muzaffar o'g'li**

*Stajor-o'qituvchi, Qarshi davlat
texnika universiteti, Qarshi,
O'zbekiston*

E-mail:

*muradullayevdoston2@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-3381-1201
Science ID: FQD-0726-0261*

Annotatsiya. Ushbu maqola neft va gaz sanoati korxonalarining murakkab tarkibli oqova va texnik suvlarini chuqur tozalash hamda qayta foydalanish texnologiyasining samaradorligini oshirishning nazariy va amaliy masalalariga bag'ishlangan. Tadqiqotda gidrodinamik flokulyatsiya, modifikatsiyalangan granulalangan filtratsiya va nanostrukturalangan polimer membranalar bazasidagi gibridd tozalash tizimining ilmiy-metodologik va kimyoviy-fizikaviy qonuniyatlari yoritib berilgan. Tajriba neft va gaz sanoati korxonalari sharoitlarida o'tkazilib, texnik suv tarkibidagi neft mahsulotlari konsentratsiyasini yuqori darajada tozalashga, muallaq moddalarni kamaytirishga hamda umumiy tuzlilik ko'rsatkichini kamaytirishga erishildi. Membranalarning bio-fouting va organik tuzlar qasmoqlari bilan to'lish mexanizmlari Kedem-Katchalsky hamda Ergun tenglamalari asosida modellashirildi. Ishlab chiqilgan texnologiya neft va gaz korxonalarida suv ta'minotining yopiq siklini yaratish va chuchuk suv sarfini qisqartirish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: neft va gaz sanoati, texnik suv, texnik suvni tayyorlash, koagulyatsiya, poliakrilamid, nanofiltratsiya, teskari osmos, yopiq suv sikli.

Received: 10.08.2026

Accepted: 30.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ И ПОДГОТОВКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОДЫ НА НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Тангиров Жасурбек
Михли угли

Доктор философии по
техническим наукам (PhD),
Ташкентский государственный
технический университет,
Ташкент, Узбекистан

Хабибуллаев Саидазиз
Шохусуворович

Доктор философии по
техническим наукам (PhD),
доцент, Ташкентский
государственный технический
университет, Ташкент,
Узбекистан

Амиркулов Нуритдин
Сайфуллаевич

Кандидат технических наук,
профессор, Ташкентский
государственный технический
университет, Ташкент,
Узбекистан

Мурадуллаев Достон
Музаффар угли

Стажёр-преподаватель,
Каршинский государственный
технический университет,
Карши, Узбекистан

Аннотация. Данная статья посвящена теоретическим и практическим вопросам повышения эффективности технологии глубокой очистки и повторного использования сложных сточных и технических вод на предприятиях нефтегазовой отрасли. В исследовании освещены научно-методологические и физико-химические закономерности гибридной системы очистки на базе гидродинамической флокуляции, модифицированной гранулированной фильтрации и наноструктурированных полимерных мембран. Эксперименты проведены в условиях предприятий нефтегазовой промышленности, что позволило достичь высокой степени очистки технической воды от нефтепродуктов, снижения содержания взвешенных веществ, а также уменьшения общей минерализации. Механизмы биообрастания и солеотложения мембран смоделированы на основе уравнений Кедема – Качальского и Эргуна. Разработанная технология позволяет создать замкнутый цикл водоснабжения на нефтегазовых предприятиях и сократить потребление пресной воды.

Ключевые слова: нефтегазовая промышленность, техническая вода, подготовка технической воды, коагуляция, полиакриламид, нанофильтрация, обратный осмос, замкнутый водных цикл.

SCIENTIFIC BASIS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF TECHNICAL WATER PURIFICATION AND TREATMENT TECHNOLOGY AT OIL AND GAS ENTERPRISES

Tangirov Jasurbek
Mikhli ugli

Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Tashkent State
Technical University, Tashkent,
Uzbekistan

Khabibullayev Saidaziz
Shokhsuvorovich

Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Associate
Professor, Tashkent State Technical
University, Tashkent, Uzbekistan

Amirqulov Nuritdin
Sayfullayevich

Candidate of Technical Sciences,
Professor, Tashkent State Technical
University, Tashkent, Uzbekistan

Muradullayev Doston
Muzaffar ugli

Trainee Lecturer, Karshi State
Technical University, Karshi,
Uzbekistan

Abstract. This article is dedicated to the theoretical and practical issues of increasing the efficiency of advanced treatment and reuse technology for complex wastewater and industrial water in oil and gas enterprises. The study highlights the scientific-methodological and physicochemical patterns of a hybrid treatment system based on hydrodynamic flocculation, modified granular filtration, and nanostructured polymer membranes. Experiments were carried out in the operational conditions of oil and gas facilities, achieving a high degree of technical water purification from petroleum products, reduction of suspended solids, and a decrease in total salinity. The mechanisms of membrane bio-fouling and scaling were modeled using the Kedem-Katchalsky and Ergun equations. The developed technology enables the creation of a closed-loop water supply cycle in oil and gas enterprises and reduces fresh water consumption.

Keywords: oil and gas industry, industrial water, technical water preparation, coagulation, polyacrylamide, nanofiltration, reverse osmosis, closed water cycle.

Kirish. Dunyo buyicha neft va gaz konlaridagi texnik suvni tozalash jarayonida ohak yoki soda yordamida cho'ktirish usullari samarasiz bo'lib qolmoqda. Texnik suvning tarkibida me'yordan ortiq qattiqlik tuzlari va og'ir metal

ionlari mavjudligi sababli texnologiyalarni ishlash muddatini kamaytirmoqda. Shuning uchun texnologiyalarni tubdan yangilashni taqozo etadi. Zamonaviy tadqiqotlar dinamik koalesent filtrlari va yuqori selektiv polimer materiallarni qo'llash orqali

qattqlik tuzlari va og'ir metal ionlarini ajratib olish texnik suv sifatini keskin oshirish mumkinligini ko'rsatmoqda [1]. Bu yondashuv texnologik uskunalar korroziyasini kamaytirish bilan birga, atrof-muhit muhofazasini ta'minlash va qimmatbaho uglevodorod xomashyosini qayta aylanmaga kiritish uchun muhim ilmiy-amaliy zamin yaratadi. Shunday ekan, neft va gaz korxonalarida texnik suvni tozalash va tayyorlash texnologiyasi samaradorligini oshirishning ilmiy asoslarini ishlab chiqish dolzarb masalalardan biri hisoblanadi.

Tadqiqotning maqsadi neft va gaz korxonalarida texnik suvni tozalash va tayyorlash samaradorligini oshiruvchi, qattqlik, muallaq moddalar va organik ifloslantiruvchilarni bosqichma-bosqich kamaytirib, suvni keyingi chuqur membranali tozalash va qayta foydalanishga tayyorlaydigan kompleks texnologiyaning ilmiy asoslarini ishlab chiqish va takomillashtirishdan iborat.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Neft va gaz korxonalarida foydalanilayotgan texnik suvni tozalash buyicha ko'plab tadqiqotlar olib borilgan va bir nechta usullar olimlar tomonida taklif etilgan. Reagentli yumshatish bosqichida ohak va soda yordamida qattqlik ionlarini cho'ktirishga o'tkazish nazarda tutiladi. Ohak yordamida magniy ionlari $Mg(OH)_2$ shaklida, kalsiy ionlarining bir qismi esa karbonat shaklida cho'ktiriladi. Soda yordamida esa kalsiy karbonat ko'rinishida cho'kma hosil bo'lishi kuchaytiriladi.

Reagent dozasini aniqlashda dastlabki qattqlik va suvning ishqoriyligi hisobga olinishi kerak. Ortiqcha reagent sarfi texnologik xarajatni oshirishi va ikkilamchi ionlar paydo bo'lishiga sabab bo'lishi mumkin.

Gidrodinamik flokulyatsiya usuli. Reagentning suv bilan tezkor aralashtirilishi koagulyantning bir tekis taqsimlanishini ta'minlaydi. Keyingi sekinroq aralashtirish bosqichida zarrachalarning o'zaro to'qnashuvi va yirik floklarning shakllanishi sodir bo'ladi. Flokulyatsiya samaradorligini baholashda aralashtirish gradienti, kontakt vaqti, flok o'lchami va cho'kish tezligi asosiy parametrlar sifatida olinishi mumkin [6-7]. Floklarning juda kuchli aralashtirilishi ularning parchalanishiga, juda sust aralashtirish esa yetarli agregatsiya hosil bo'lmasligiga olib keladi. Shu sababli gidrodinamik rejimni tajriba orqali optimallashtirish zarur.

O'zgaruvchan magnit maydon bilan faollashtirish usuli. Olib borilgan tadqiqotda cho'ktirishdan oldingi bosqichda suvga o'zgaruvchan magnit maydon bilan ishlov berish taklif qilingan. Qurilma elektromagnit o'ramlar bilan jihozlangan bo'lib, dastlabki materialda maydon kuchlanishi 8 dan 12 mT gacha, chastotasi 50 Hz, ishlov davomiyligi esa (3–5) minut diapazonida berilgan.

Ishlab chiqilgan gipotezaga ko'ra, magnit ishlov $CaCO_3$ va $Mg(OH)_2$ kristallanish markazlarining shakllanishiga yordam berib, cho'kma zarrachalarining yiriklashishi va tezroq cho'kishiga sharoit yaratishi mumkin. Biroq ushbu mexanizmi ilmiy jihatdan kuchli tasdiqlash uchun magnit maydonsiz nazorat tajribasi, turli maydon kuchlanishlari va turli ishlov vaqtlarining alohida taqqoslanishi kerak.

Cho'ktirish usuli. Magnit faollashtirishdan so'ng suv gravitatsion cho'ktirgichga yuboriladi. Ushbu bosqichda yirik floklar va mineral cho'kmalar suvdan ajratiladi. Cho'ktirish samaradorligini faqat suvdagi qattqlikning kamayishi bilan baholash yetarli emas [8-9]. Cho'kma hajmi, cho'kish tezligi, muallaq moddalar konsentratsiyasi va loyqalik ham aniqlanishi lozim.

Kationitli filtrlash usuli. Cho'ktirishdan keyin suv kationitli filtrdan o'tkaziladi. Ushbu bosqichda suv tarkibida qolgan kalsiy va magniy ionlarini qo'shimcha kamaytirish mumkin [10-11]. Kationitning ishchi almashinish sig'imi, regeneratsiya vaqti, regenerant sarfi va filtr qatlamidagi bosim yo'qotilishi ekspluatatsion nazorat ko'rsatkichlari sifatida olinadi.

Modifikatsiyalangan granulalangan filtrlash usuli. Granulalangan filtrning asosiy vazifasi mayda muallaq zarrachalar, flok qoldiqlari va membrana yuzasiga tushishi mumkin bo'lgan dispers ifloslantiruvchilarni kamaytirishdan iborat [12-13]. Filtr qatlamidagi bosim yo'qotilishini baholash uchun Ergun tenglamasidan foydalanish mumkin:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{(150\mu(1-\varepsilon)^2v)}{(\varepsilon^3d_p^2)} + \frac{(1.75\rho(1-\varepsilon)v^2)}{(\varepsilon^3d_p)} \quad (1)$$

bu yerda: $\Delta P/L$ — filtr qatlamining birlik uzunligiga to'g'ri keluvchi bosim yo'qotilishi; μ — suvning dinamik qovushqoqligi; ε — filtr qatlamining g'ovakligi; v — filtratsiyaning yuzaki tezligi; d_p — granulalar diametri; ρ — suv zichligi.

Ushbu model filtr granulalari o'lchami,

qatlam g'ovakligi va filtratsiya tezligining gidravlik qarshilikka ta'sirini aniqlash imkonini beradi.

Membranali chuqur tozalash usuli. Oldindan tozalangan suv nanofiltratsiya yoki teskari osmosga yuborilishi mumkin. NF jarayoni ikki valentli ionlar va ayrim organik komponentlarni kamaytirishda, RO esa yuqori mineralizatsiyani yanada chuqurroq pasaytirishda qo'llanadi. Ishlab chiqarish suvlarini membranalar bilan tozalash bo'yicha tadqiqotlar NF va RO uchun oldindan tozalash sifati, ishchi bosim, oqim tezligi va membrana foulingini muntazam nazorat qilish zarurligini ko'rsatadi.

Membranali jarayonni Kedom–Katchalsky yondashuvi asosida suv va erigan moddalarning membrana orqali transportini ifodalash mumkin. Bunda real qurilma uchun membrana qarshiligi, konsentratsion qutblanish va fouling qarshiliklari tajriba natijalari bilan aniqlanishi kerak.

Yuqorida keltirilgan usullar asosida texnik suvni tozalash uchun tolali yuklamaga ega filtrlash usuli [2]. Bu usul yuqori filtrlash samaradorligi (93÷96)% gacha asosan mexanik (Qum, Shag'al) va suspenziya moddalardan (LOY, o'simlik qoldiqlari) tozalash uchun muljallangan va filtrlovchi qatlamni yuvish orqali qayta foydalanish mumkinligi, ixchamligi tufayli kichik maydonlarda ham qo'llash mumkinligi ushbu usulning asosiy afzalligi hisoblanadi. Kamchilligi yuklama yuvilishi kerak, og'ir metallar yoki yog'li moddalarni tozalashda unchalik samarali emas usul hisoblanmaydi. Ohak yoki ishqordan foydalangan holda suvni yumshatish usuli [3]. Bu usul suvdagi qattiqlikni kamaytirishda (95÷98)% gacha natija bergan. Afzalligi avtomatlashtirishga mos, qayta regeneratsiya qilish mumkinligi. Kamchilligi ishlatilgan granulalarni qayta tiklash uchun kimyoviy moddalar talab etilishi, to'liq tozalash uchun bir nechta bosqichli qurilmalar kerak bo'lishi, regeneratsiya va kimyoviy moddalar sababli ekspluatatsiya xarajatlari nisbatan balandligi. Modifikatsiyalangan natriy dodetsilbenzolsulfonat xitozani asosida suvni yumshatish texnologiyasi [4-5]. Afzalligi suvdagi qattiqlikni kamaytirishda (99,7-99,9)% gacha natija bergan. Landjele stabillik indeksi 7,0 dan 9,2 gacha oshirilgan. Bu suvni cho'kma hosil qilishdan saqlashga yordam beradi. Ekologik jihatdan xavfsiz tabiiy moddalar asosida tayyorlangan. Sorbent samaradorligi 95% va undan yuqori to'yinish darajasiga ega ekanligi texnik suvni tozalashda

samarali ekanligini ko'rsatadi. Reagent sarfi, tozalash jarayoni ko'p vaqt talab qilishi, sifatni nazorat qilish uchun, zamonaviy vositalar kerak bo'lishi ushbu usulning kamchilligi hisoblanadi. Yuqorida keltirilgan usullardan kelib chiqib neft va gaz korxonalarida texnik suvni tozalash va tayyorlash texnologiyasi samaradorligini oshirishning ilmiy asoslari ishlab chiqilda va quyidagi natijalarga erishildi.

Natijalar. Tadqiqot natijalariga ko'ra texnik suvga reagent bilan ishlov berilgandan keyin suvni cho'ktirish bosqichida o'zgaruvchan magnit maydon bilan qo'shimcha faollashtirish orqali texnik suvni tozalash usulini takomillashtirishning ilmiy asoslari ishlab chiqil chiqildi. Taklif etilayotgan suvni yumshatish usuli, ma'lum bo'lgan usul singari, suvga reagent (oxak va soda) aralashmasini kiritish, hosil bo'lgan cho'kmani cho'ktirish va suvni kationit filtdan o'tkazishni o'z ichiga oladi, biroq undan farqli o'laroq, reagent kiritilgandan so'ng, cho'ktirish bosagichida suv 8 dan 12 mTl kuchlanishga ega o'zgaruvchan magnit maydon bilan 3 dan 5 min davomida ishlanadi, bunda magnit maydon chastotasi 50 Gts ni tashkil etadi. Magnit maydonning ta'siri natijasida kaltsiy karbonati va magniy gidroksidi mikrokristallarining shakllanish markazlari soni ortadi, bu esa cho'kma zarrachalarining yiriklashuvini va tezroq cho'kishini ta'minlaydi, natijada reagentning kimyoviy reaksiyaga kirishish samaradorligi oshadi va uning sarfini kamaytirish imkonini beradi. Quyidagi 1-rasmda taklif etilayotgan usulni amalga oshirish uchun qurilmaning texnologik sxemasi keltirilgan.



1-rasm. Taklif etilayotgan usulni amalga oshirish uchun qurilmaning texnologik sxemasi.

Taklif etilayotgan usulni amalga oshirish uchun qurilmaning texnologik sxemasi keltirilgan bo'lib, unda: 1 - dastlabki suv rezervuari; 2 - reagent dozlagich; 3 - aralashtirgich kamerasi; 4 - magnit faollashtirgich (elektromagnit o'ramlar bilan

jihozlangan); 5 - cho'ktirgich; 6 - kationit filtri; 7 - tayyor suv rezervuari ko'rsatilgan. Ushbu texnologik sxemadan kelib chiqib texnik suvni tozalash samaradorligi quyidagi 2-formula bilan aniqlanadi:

$$E = \left(\frac{C_0 - C_1}{C_0} \right) \cdot 100, \% \quad (2)$$

bu yerda C_0 — dastlabki suvdagi ifloslantiruvchi modda konsentratsiyasi, C_1 — tozalashdan keyingi konsentratsiya.

Agar tajriba uch yoki undan ortiq marta takrorlansa, natijalar (1-jadval)ni quyidagi ko'rinishda berish maqsadga muvofiq (3-formulaga qarang):

$$E = \bar{E} \pm U \quad (3)$$

bu yerda: $\bar{E}$ — o'rtacha tozalash samaradorligi, U — yig'indi standart noaniqligi.

Ishlab chiqilgan ikki bosqichli kompleks usuldan olingan natijalar asosida texnik suvni qattqlik tuzlaridan va aralashmalardan suv yumshatildi va quyidagi natijalarga erishildi (1-jadvalga qarang):

1-jadval

Qattqlik tuzlari va aralashmalardan suvni yumshatish natijalari

Parametr	Konsentratsiya, mg ekv/l		Tozalash darajasi, %
	Birinci suvda	Kompleks qayta ishlashdan keyingi suvda	
Ca^{2+}	53,0	0,16	99,7
Mg^{2+}	6,16	-	99,9
Sr^{2+}	5,45	0,01	99,7
Mn^{2+}	6,16	0,01	99,8
Fe^{3+}	30,1	-	99,9
Cu^{2+}	6,49	-	99,9
Pb^{+}	2,68	-	99,9
Ag^{+}	4,30	-	99,9
Sn^{4+}	5,3	-	99,9

Neftni sovitish tizimlarida foydalanilayotgan texnik suvning dastlabki sifat tarkibida kalsiy (Ca^{2+}) — 53,0 mg-ekv/l, magniy (Mg^{2+}) — 6,16 mg-ekv/l, stronsiy (Sr^{2+}) — 5,45 mg-ekv/l, marganes(II) (Mn^{2+}) — 6,16 mg-ekv/l, temir(III) (Fe^{3+}) — 30,1 mg-ekv/l, mis(II) (Cu^{2+}) — 6,49 mg-ekv/l, qo'rg'oshin(I) (Pb^{+}) — 2,68 mg-ekv/l, kumush (Ag^{+}) — 4,30 mg-ekv/l va qalay(IV) (Sn^{4+}) — 5,3 mg-ekv/l miqdorda mavjud bo'ldi. Yaratilgan suvni yumshatish usuli qo'llanilgandan so'ng, tozalash darajasi kalsiy uchun 99,7%, magniy uchun 99,9%, stronsiy uchun 99,7%, marganes(II) uchun 99,8%, temir(III) uchun 99,9%, mis(II) uchun 99,9%, qo'rg'oshin(I) uchun 99,9%, kumush uchun 99,9% va qalay(IV) uchun 99,9% ni tashkil etdi.

Xulosa. Neft va gaz korxonalarning texnik

hamda ishlab chiqarish suvlari murakkab va o'zgaruvchan tarkibga ega bo'lganligi sababli ularni bir bosqichli texnologiya yordamida samarali tayyorlash imkoniyati cheklangan. Shu sababli fizik-kimyoviy va membranali jarayonlarni birlashtirgan gibrilid tizim ilmiy-amaliy jihatdan maqsadga muvofiq hisoblanadi.

Olib borilgan tadqiqotlar natijasida o'zgaruvchan magnit maydonda faollashtirishni o'z ichiga olgan taklif etilgan usul bo'yicha 99,7 dan 99,9% gacha bo'lgan tozalash darajasi qayd etildi.

Magnit maydonning haqiqiy qo'shimcha ta'sirini aniqlash uchun 8, 10 va 12 mT kuchlanish hamda 3, 4 va 5 minutlik ishlash davomiyligi bo'yicha faktorli tajriba o'tkazish va natijalarni magnit maydonsiz nazorat namunasi bilan taqqoslash maqsadga muvofiq.

Tozalash samaradorligini baholashda neft mahsulotlari, umumiy qattqlikni belgilovchi tuzlar (Ca^{2+} va Mg^{2+}) hamda metall ionlarining miqdori va elektr o'tkazuvchanlik kabi parametrlarni birgalikda aniqlash zarur.

Granulalangan filtrning gidravlik qarshiligini Ergun tenglamasi, membrana jarayonini esa Kedem-Katchalsky yondashuvi orqali model-lashtirish texnologik parametrlarni optimallashtirish imkonini beradi.

Membrana bosqichining uzoq muddatli samaradorligini baholashda nafaqat boshlang'ich tozalash darajasi, balki permeat oqimining vaqt bo'yicha o'zgarishi, bosimning ortishi va fouling tezligi ham hisobga olinishi kerak.

Taklif etilayotgan kompleks texnologiya suvni qayta foydalanish darajasini oshirish, chuchuk suv sarfini kamaytirish hamda texnologik uskunalarni qattqlik tuzlari va organik ifloslantiruvchilardan himoyalash uchun istiqbolli hisoblanadi.

Kelgusidagi tadqiqotlarda laboratoriya tajribalaridan pilot qurilmaga o'tish, texnologiyaning suv balansi va texnik-iqtisodiy samaradorligini baholash, shuningdek, real ishlab chiqarish sharoitida uzoq muddatli sinovlarni amalga oshirish lozim.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Vasilev, A. A., Korunov, A. N., & Shishkanov, B. A. (2012). O'z tajribalaridan olingan texnik tahlillar. *Territoriya Neftgaz*, (12).
- [2] Вербин, В. А., Петровский, О. В., & Панов, В. П. (1981). Фильтр с волокнистой загрузкой для очистки сточных вод. *Бюллетень НТИ ЦНИИ информации и технико-экономических исследований чёрной металлургии*.
- [3] Гравеленд, А. (1983). Умягчение воды с применением реакторов, загруженных гранулированными материалами. *American Water Works Association*, 75(12), 619–625.
- [4] Тангиров, Ж. М., Хабибуллаев, С. Ш., & Ёдгоров, Н. Н. (2024). Сувни юмшатиш усули (Ўзбекистон Республикаси патенти № IAP 7824).
- [5] Tangirov, J. (2025). Neft qatlamiga haydalayotgan texnik suvning qattiqligini o'lchash usul va uslubiyoitini takomillashtirish. *Standart ilmiy-texnik jurnali*, (2).
- [6] Munirasu, S., Abu Haija, M., & Banat, F. (2016). Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment—A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 183–202. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.010>
- [7] Ojo, S., et al. (2022). Oilfield-produced water treatment using conventional and membrane-based technologies for beneficial reuse: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 308, 114556. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114556>
- [8] Assessing the potential and limitations of membrane-based technologies for the treatment of oilfield produced water. (2023). *Alexandria Engineering Journal*, 68, 787–815. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.12.013>
- [9] Alzahrani, S., & Mohammad, A. W. (2014). Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 4, 107–133. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.09.007>
- [10] Nasiri, M., Jafari, I., & Parniankhoy, B. (2017). Oil and gas produced water management: A review of treatment technologies, challenges, and opportunities. *Chemical Engineering Communications*, 204(8), 990–1005. <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1330747>
- [11] Siagian, U. W. R., et al. (2024). From waste to resource: Membrane technology for effective treatment and recovery of valuable elements from oilfield produced water. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122717>
- [12] Produced water treatment by membranes: A review from a colloidal perspective. (2017). PMID: 28314436.
- [13] Adepitan, et al. (2026). Systems-level optimization of hybrid produced water treatment systems for sustainable oil and gas production: A review of current technologies. *Global Challenges*. <https://doi.org/10.1002/gch2.202500575>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Tangirov, J. M., Xabibullayev, S. S., Amirq ulov, N. S., & Muradullayev, D. M. (2026). Neft va gaz korxonalarida texnik suvni tozalash va tayyorlash texnologiyasi samaradorligini oshirishning ilmiy asoslari. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.16>

УДК: 553.98.041.552.51

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.19

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ ЮРЫ БЕШКЕНТСКОГО ПРОГИБА (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЧУНАГАР)



**Абдуллаев Гайбулла
Сайфуллаевич**

Доктор геолого-
минералогических наук (DSc),
профессор, иностранное
предприятие общества с
ограниченной
ответственностью «Petromaruz
Uzbekistan», Ташкент,
Узбекистан
E-mail:
gaybullat.abdullaev@pmuz.uz
ORCID ID: 0009-0006-6183-9530
Science ID: DBX-0826-0010



**Юлдашев Назарбек
Нарзиевич**

Заведующий лабораторией,
старший научный сотрудник,
«Институт геологии и разведки
нефтяных и газовых
месторождений», Ташкент,
Узбекистан
E-mail: Yuldashev_nn@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-3972-6450
Science ID: MQD-0525-0132



**Давронов Нодирбек
Нуриддин угли**

Докторант, младший научный
сотрудник, Ташкентский
государственный технический
университет, «Институт
геологии и разведки нефтяных и
газовых месторождений»,
Ташкент, Узбекистан
E-mail: ndavronov11@gmail.com
ORCID ID: 0009-0000-1049-3548
Science ID: MQD-0526-0376

Аннотация. В статье на основе геолого-геофизических данных выполнена оценка перспектив нефтегазоносности нижне- и среднеюрских терригенных отложений на примере месторождения Чунагар, расположенного в восточной части Бешкентского прогиба. По результатам интерпретации сейсмических данных МОГТ-3D проанализированы структурные особенности территории, брахиантуклинальное строение, тектонические нарушения, а также условия возможного формирования скоплений углеводородов в структурных и неантуклинальных ловушках. На основании геолого-геофизических данных и результатов испытания поисковых скважин на площади Чунагар обосновано наличие газовых и газоконденсатных скоплений в нижне-среднеюрских терригенных отложениях. Изучены показатели пористости и газонасыщенности пород-коллекторов в разрезах скважин и выделены перспективные продуктивные интервалы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что юрские терригенные отложения Бешкентского прогиба могут рассматриваться как один из важных источников прироста запасов углеводородов. Даны рекомендации по продолжению поисково-разведочных работ с целью уточнения границ распространения залежей месторождения Чунагар, обеспечения дополнительного прироста запасов и освоения перспективных участков.

Ключевые слова: Бешкентский прогиб, месторождение Чунагар, нижняя и средняя юра, терригенные отложения, нефтегазоносность, углеводороды, газоконденсат, коллектор, неантуклинальная ловушка, МОГТ-3D, пористость, газонасыщенность, поисковая скважина.

Received: 17.08.2026

Accepted: 31.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

BESHKENT EGILMASIDAGI QUYI-O'RTA TERRIGEN YURA YOTQIZIQLARINING NEFTGAZLILIK ISTIQBOLLARINI BAHOLASH (CHUNAGAR KONI MISOLIDA)

**Abdullayev G'aybulla
Sayfullayevich**

Geologiya-mineralogiya fanlari
doktori (DSc), professor,
"Petromaruz Uzbekistan"
mas'uliyati cheklangan
jamiyatining xorijiy korxonasi,
Toshkent, O'zbekiston

**Yuldashev Nazarbek
Narziyevich**

Laboratoriya mudiri, katta ilmiy
xodim, "Neft va gaz konlari
geologiyasi hamda qidiruv
instituti", Toshkent, O'zbekiston

**Davronov Nodirbek
Nuriddin o'g'li**

Tayanch doktorant, kichik ilmiy
xodim, Toshkent davlat texnika
universiteti, "Neft va gaz konlari
geologiyasi hamda qidiruv
instituti", Toshkent, O'zbekiston

Annotatsiya. Maqolada Beshkent egilmasining sharqiy qismida joylashgan Chunagar koni misolida quyi va o'rta yura davriga mansub terrigen yotqiziqlarning neft-gazlilik istiqbollari geologik-geofizik ma'lumotlar asosida baholangan. UCHNU-3D seysmik ma'lumotlarini interpretatsiya qilish natijasida hududning strukturaviy xususiyatlari, braxiantiklinal tuzilishi, tektonik buzilishlar hamda uglevodorodlarning strukturaviy va noantiklinal tutqichlarda to'planish imkoniyatlari tahlil qilingan. Chunagar maydonida burg'ilangan izlov quduqlarining geologik-geofizik va sinov natijalari asosida quyi-o'rta yura terrigen yotqiziqlarida gaz va gaz-kondensat to'planmalari mavjudligi asoslangan. Quduqlar kesimida kollektor jinslarning g'ovakligi va gazga to'yinganlik ko'rsatkichlari o'rganilib, istiqbolli mahsuldor intervallar ajratilgan. Olingan natijalar Beshkent egilmasida yura davri terrigen yotqizilari uglevodorod zaxiralarini oshirishning muhim manbalaridan biri ekanligini ko'rsatadi. Shuningdek, Chunagar konidagi uglevodorod uyumlarining tarqalish chegaralarini aniqlashtirish, qo'shimcha zaxiralar o'sishini ta'minlash hamda istiqbolli uchastkalarni o'zlashtirish uchun keyingi izlov-qidiruv va razvedka ishlarini davom ettirish bo'yicha tavsiyalar berilgan.

Kalit so'zlar: Beshkent egilmasi, Chunagar koni, quyi-o'rta yura, terrigen yotqiziq, neft-gazlilik, uglevodorod, gaz-kondensat, kollektor, noantiklinal tutqich, UCHNU-3D, g'ovaklik, gazga to'yinganlik, izlov qudug'i.

EVALUATION OF THE HYDROCARBON POTENTIAL OF THE LOWER– MIDDLE JURASSIC TERRIGENOUS SEQUENCES IN THE BESHKENT TROUGH (USING THE CHUNAGAR DEPOSIT AS AN EXAMPLE)

**Abdullayev Gaybulla
Sayfullayevich**

Doctor of Geological and
Mineralogical Sciences (DSc),
Professor, Foreign Enterprise of
"Petromaruz Uzbekistan" Limited
Liability Company, Tashkent,
Uzbekistan

**Yuldashev Nazarbek
Narziyevich**

Head of the Laboratory, Senior
Researcher, "Institute of Geology
and Exploration of Oil and Gas
Fields", Tashkent, Uzbekistan

**Davronov Nodirbek
Nuriddin ugli**

PhD student, Junior Researcher,
Tashkent State Technical
University, "Institute of Geology
and Exploration of Oil and Gas
Fields", Tashkent, Uzbekistan

Abstract. The article evaluates the hydrocarbon potential of the Lower–Middle Jurassic terrigenous deposits using geological and geophysical data from the Chunagar field, located in the eastern part of the Beshkent Trough. Interpretation of 3D CDP seismic data was used to analyze the structural features of the area, its brachyanticlinal structure, tectonic faults, and the potential conditions for hydrocarbon accumulation in structural and non-anticlinal traps. Geological, geophysical, and well-testing results obtained from exploration wells at the Chunagar field substantiate the presence of gas and gas-condensate accumulations within the Lower–Middle Jurassic terrigenous deposits. Reservoir porosity and gas-saturation parameters were evaluated, and prospective productive intervals were identified in the well sections. The obtained results indicate that the Jurassic terrigenous deposits of the Beshkent

Trough may represent an important source for increasing hydrocarbon reserves. Recommendations are provided for further exploration and appraisal activities aimed at delineating the hydrocarbon accumulations of the Chunagar field, increasing recoverable reserves, and developing prospective areas.

Keywords: Beshkent Trough, Chunagar field, Lower–Middle Jurassic, terrigenous deposits, hydrocarbon potential, hydrocarbons, gas condensate, reservoir, non-anticlinal trap, 3D CDP seismic survey, porosity, gas saturation, exploration well.

Введение. В настоящее время в Бухаро-Хивинской нефтегазоносной области в целом, и в пределах Бешкентского прогиба в частности, уже открыто большинство крупных и перспективных объектов, связанных с отложениями карбонатной формации. В связи с этим актуальным становится вопрос поиска и разведки залежей углеводородов (УВ) в новых стратиграфических уровнях, связанных с ловушками структурного и неструктурного типов. Одним из таких уровней являются отложения терригенной формации юры (ТФ). Отложения ниже-среднеюрской терригенной формации (ТФ) являются одним из источников прироста запасов УВ.

Анализ литературы. А. М. Акрамходжаев (1973, 1974 гг.) установил, что в отложениях ТФ присутствуют породы, насыщенные гумусовым органическим веществом, которые в послемеловое время прошли все стадии (фазы) газообразования и выделили значительные объёмы углеводородных газов [2]. Ни в одном другом разрезе осадочного чехла не встречаются породы, столь обогащённые гумусовым веществом. Рассматриваемый пласт своеобразен также типами выявленных в его объёме залежей углеводородов. Всё это даёт полное основание рассматривать его как отчётливо выделяющееся геологическое тело, обладающее всеми признаками формации с общепризнанными перспективами нефтегазоносности (А. Г. Бабаев, А. Х. Нугманов и др.) [3, 4].

Однако фациальная и литологическая неоднородность терригенной толщи в вертикальном и горизонтальном направлениях, наличие в разрезе многочисленных выклиниваний, фациальных замещений и других изменений затрудняют корреляцию пластов и прослеживание продуктивных горизонтов, связанных с ловушками антиклинального и неантиклинального типов.

Зоны литологического выклинивания и

стратиграфического несогласия, связанные с ловушками УВ неантиклинального типа, привлекают внимание исследователей с самого начала освоения нефтегазового потенциала в основных нефтегазоносных регионах Узбекистана, в том числе и в отложениях ТФ Бухаро-Хивинской области.

С этой целью, структура Чунагар тер.юр. в административном отношении расположена в Гузарском районе Кашкадарьинской области, в тектонически отношении на восточной части Бешкентского прогиба.

Строения структуры детально изучено путем интерпретации данных МОГТ 3D. С использованием информации по данным интерпретации МОГТ 3D структура специализирована АО «Узбекгеофизика» и филиала «ЯГЭ» детально подготовлена к глубокому бурению по отложениям терригенных пород раннее и среднеюрского периода.

Структура представляет собой брахиантиклинальную складку северо-восточного простирания по терригенным юрским отложениям, ограниченную в юго-восточной части прерывистыми разрывами. Размеры структуры: по отражающему горизонту терригенных отложений Т₇ (J₁₊₂), по изогипсе «-3240м» составляет - 5,2 x 1,8 км, высота 80 м, площадь 8,2 км² [1].

Методика обработки и результаты. Поисковая скважина №1 Чунагар тер.юр. была заложена на пересечении сейсмопрофилей In Line 2979 и Cr Line 3320 с целью изучения литологии разреза и поисков залежей нефти и газа в верхнеюрских карбонатных и нижнесреднеюрских терригенных отложениях. Испытание проведено через фильтр в интервале 4698-4459 м, в результате испытания был получен приток газа дебитом Q_г=84,779 тыс. м³/сут и конденсат дебитом Q_к = 3,391 м³/сут на 14 мм штуцере.

Отличительными особенностями месторождения являются наличие нетрадиционных

толщ коллектора в терригенных отложениях ниже-среднеюрского возраста, т.к. впервые было открыто газоконденсатное месторождение в терригенных отложениях юры в Бешкентском прогибе БХР.

Исходя из этого возникает задача эффективного вскрытия данных отложений. Для её решения требуется изучить некие схожие свойства и закономерности успешно вскрытых скважин, давших приток углеводородов в интересующем нас интервале. Запасы, содержащиеся в типичных, понятных нам традиционных коллекторах в общем итоге конечны. В связи с этим необходимо продолжать работы в области наращивания ресурсной базы нетрадиционных коллекторов, таких как терригенные отложения юрского возраста, и зоны литологического разуплотнения, которые имеются в геологическом разрезе Бешкентского прогиба. Кроме того, сводовая часть структуры вблизи разлома являются наиболее перспективными предпосылками при закладывании поисково-оценочных и разведочных скважин. Данные литотипы обладают начальной пористостью в процессе седиментации благодаря обломочному структурному строению, и предполагаемая зона распространения залежи УВ находится в непосредственной близости структурных нарушений, которые связаны с пликтивной тектоникой, таких как трещины и разломы.

Поисковая скважина № 2 Чунагар-тер.юра расположена в 1100 метрах к юго-западу от разведочной скважины №1 площади Чунагар (тер.юра), в 500 метрах к югу от разведочной скважины №5 месторождения Чунагар, в 350 метрах к северо-западу от разведочной скважины №10 месторождения Чунагар, в 790 метрах к востоку от скважины №2 площади Чунагар и на пересечении сейсмопрофилей In Line 2969 и Cross Line 3276 структуры. Всего в скважине испытано 4 интервалов, в одном из них 4482-4479 м, 4466-444 м, (4520-4504) м получен газ дебитом 80,507 тыс. м³/с через 6 мм и 4 мм штуцеры соответственно.

В связи с этим для продолжения доразведочных работ по выяснению контуров распространения залежи месторождения Чунагар тер. юра на восточной части структуры

и получения дополнительного прироста запасов УВ, рекомендуется заложить поисковую скважину № 3 Чунагар т.ю. на пересечении сейсмопрофилей InLine 2983 и CrossLine 3370 в северо - восточном направлении на расстоянии 1170 м от поисковой скважины № 1 Чунагар т.ю. и разведочную скважину № 4 Чунагар т.ю. на пересечении сейсмопрофилей InLine 2936 и CrossLine 3242 в юго - западном направлении на расстоянии 1245 м от поисковой скважины № 2 Чунагар т.ю. Проектная глубина скважины 4700 м, со вскрытием кровельной части XX горизонта.

Поисковая скважина № 3 Чунагар-тер.юра расположена в 1170 метрах к юго-западу от разведочной скважины №1 Чунагар т.ю. на пересечении сейсмопрофилей In Line 2983 и Cross Line 3242 структуры. На данный момент глубина скважины достигла 4700 метров. Она расположена в терригенных отложениях юрского периода и готовится к проведению испытаний.

По результатам интерпретации программы Geo Office Solver АО «Узбекгеофизика» установлено, что интервалы 4115–4475 м представлены газонасыщенными пластами с коэффициентом пористости 10–13% и коэффициентом газонасыщенности 54–66%. Интервалы 4476–4552 м характеризуются как газо-водонасыщенные пласты с коэффициентом пористости 7–11% и коэффициентом газонасыщенности 49–54%. Интервалы 4553–4594 м представлены низкопористыми породами-коллекторами с коэффициентом пористости 4–7%.

Согласно заключению системы АСО «INGEF-W» ГУ «ИГИРНИГМ», интервалы 4201–4209 м, 4257–4258 м, 4292–4293 м, 4315–4323 м, 4385–4391 м, 4452–4455 м, 4467–4475 м, 4477–4481 м, 4532–4537 м, 4539–4546 м, 4549–4560 м характеризуются коэффициентом пористости 8–13% и коэффициентом газонасыщенности 51–75%, остальные интервалы представлены низкопористыми пластами с коэффициентом пористости 5–6%.

С учётом результатов бурения и комплексного анализа проведённых геолого-геофизических исследований установлено, что поисковая скважина №3 площади Чунагар (тер.

юра) вскрыла проектный продуктивный горизонт.

В связи с этим предлагается прекратить бурение на глубине 4700 м, выполнить спуск эксплуатационной колонны $\varnothing 139,7/168,3$ мм до глубины 4650 м с последующим креплением методом двухступенчатого цементирования, а также провести испытание продуктивных интервалов в открытом стволе в интервале 4650–4700 м и на всех запланированных объектах в установленном порядке в соответствии с утверждённой проектно-сметной документацией на строительство скважины.

В настоящее время в поисковой скважине №3 площади Чунагар (терригенная юра) проводятся испытательные работы в открытом стволе. По результатам испытаний в интервале 4700–4631 м из скважины получен приток пластовой воды с относительной плотностью 1,15 г/см³. Испытательные работы продолжаются, осуществляется дальнейшая оценка фильтрационно-ёмкостных свойств вскрытых пластов и характера их флюидонасыщенности.

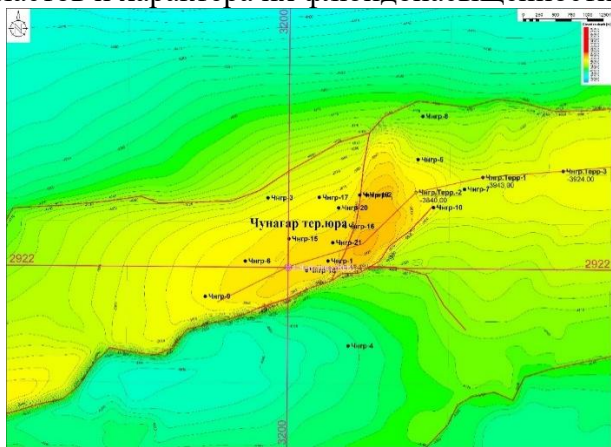


Рис.1. Структурная карта по кровле юрских терригенных отложений (XXI-горизонт).

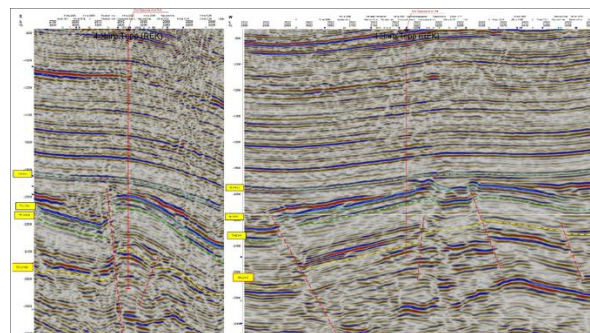


Рис.2. Временной разрез по профилю Inline 2922 и Cross Line 3200.

На месторождении Чунагар (тер. юра) произведен подсчет запасов газа по залежи, приуроченной к XXI-1 горизонту.

Прирост запасов углеводородов на месторождении Чунагар (тер. юра) был получен за счёт положительных результатов бурения и испытания скважины №1,2 Чунагар (тер. юра).

Закключение. С целью проведения детальных доразведочных работ по выяснению контуров распространения залежи месторождения Чунагар тер.юра на зной части структуры и получения дополнительного прироста запасов УВ, рекомендуется заложить разведочную скважину № 4 Чунагар тер.юра на пересечении сейсмопрофилей In Line 2922 и Cross Line 3200 на юго-западном направлении от второй скважины. Проектная глубина скважины 4700 м, со вскрытием кровельной части терригенных отложений нижней юры (рис. 1;2).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Абдуллаев, Г. С., Богданов, А. Н., & Эйдельмант, Н. К. (2019). Месторождения нефти и газа Республики Узбекистан (pp. 428–430). Zamin nashr.
- [2] Акрамходжаев, А. М. (1971). Особенности литологического состава, стратиграфии и перспективы нефтегазоносности мезозойских и палеогеновых отложений Южного и Юго-Западного Узбекистана. Фан.
- [3] Бабаев, А. Г., Габрильян, Р. А., & Саямова, С. К. (1977). Терригенная формация юрского возраста БХР и Юго-Западного Гиссара и её нефтегазоносность. Недра.
- [4] Нугманов, А. Х. (1966). Окись натрия как показатель солености древних водоемов. Вопросы геологии и нефтегазоносности Узбекистана (Вып. 1). Фан.

- [5] Юлдашев, Н. Н. (2021). Актуальные вопросы изучения строения и перспектив нефтегазоносности юрских терригенных отложений Бухаро-Хивинского региона (Республика Узбекистан). Нефтегазовая геология. Теория и практика, 16(1).
- [6] Юлдашев, Н. Н., & Аюпова, Н. А. (2019, 22–25 апреля). Перспективы терригенных отложений юрского возраста центральной части Чарджоуской ступени. Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ – 2019» (pp. 12–13).

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Абдуллаев, Г. С., Юлдашев, Н. Н. и Давронов, Н. Н. (2026). Оценка перспектив нефтегазоносности терригенных отложений нижней и средней юры Бешкентского прогиба (на примере месторождения Чунагар). Цифровые технологии в промышленности, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.19>

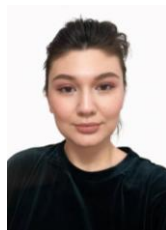
УДК: 550.832.04

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.36

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА ДЛЯ БУХАРА-ХИВИНСКОГО РЕГИОНА ПУТЕМ СРАВНЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ КРИВЫХ



Гайратова Малика Зокировна

Высшее образование, техник-геофизик, АО «Узбекгеофизика», Ташкент, Узбекистан

E-mail: malikakarimova555@gmail.com

ORCID ID: 0009-0006-6544-3760

Science ID: PTN-0826-0013

Аннотация. В работе рассматривается задача восстановления отсутствующих или низкокачественных данных акустического каротажа применительно к условиям Бухара-Хивинского региона. Цель исследования состоит в сопоставлении двух подходов к построению синтетической акустической кривой — метода Залеева и метода Фауста — и определении варианта, обеспечивающего наиболее близкое соответствие исходным данным опорной скважины. Для расчётов использованы данные геофизических исследований, представленные в LAS-файле и обработанные в программе «Камертон». Для каждого подхода построена синтетическая кривая, после чего выполнено графическое сопоставление с исходной кривой и рассчитан коэффициент корреляции. Для метода Залеева получено значение 0,84, тогда как применение метода Фауста обеспечило корреляцию 0,88. Полученные результаты показывают более высокую степень соответствия синтетической кривой исходным данным при использовании метода Фауста. Дополнительно отмечена необходимость учитывать изменение физических свойств разреза с глубиной, в частности градиент уплотнения. Результаты могут быть использованы при восстановлении акустических данных на других скважинах исследуемого месторождения при отсутствии выраженной латеральной изменчивости.

Ключевые слова: акустический каротаж, восстановление данных, синтетическая кривая, сейсмическое моделирование, геологический разрез, метод Залеева, метод Фауста, опорная скважина, Бухара-Хивинский регион.

Received: 27.08.2026

Accepted: 17.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

HAQIQIY VA SINTETIK EGRI CHIZIQLARNI TAQQOSLASH ORQALI BUXORO-XIVA MINTAQASI UCHUN AKUSTIK KARETOJNI TIKLASHNING OPTIMAL USULINI TANLASH

G'ayratova Malika Zokirovna

Oliy ma'lumotli, texnik-geofizik, "O'zbekgeofizika" AJ, Toshkent, O'zbekiston

Annotatsiya. Ushbu ishda Buxoro–Xiva mintaqasi sharoitida mavjud bo'lmagan yoki sifati past bo'lgan akustik karotaj ma'lumotlarini qayta tiklash masalasi ko'rib chiqilgan. Tadqiqotning maqsadi Zalyaev

va Faust usullari asosida sintetik akustik egri chiziqni qurish yondashuvlarini taqqoslash hamda tayanch quduqning dastlabki ma'lumotlariga eng yaqin muvofiqlikni ta'minlaydigan usulni aniqlashdan iborat. Hisob-kitoblarda LAS-faylda keltirilgan va "Kamerton" dasturida qayta ishlangan geofizik tadqiqot ma'lumotlaridan foydalanildi. Har bir yondashuv bo'yicha sintetik egri chiziq qurildi, so'ngra u dastlabki egri chiziq bilan grafik jihatdan taqqoslandi va korrelyatsiya koeffitsienti hisoblandi. Zalyaev usuli bo'yicha korrelyatsiya koeffitsienti 0,84 ni, Faust usuli qo'llanilganda esa 0,88 ni tashkil etdi. Olingan natijalar Faust usulidan foydalanilganda sintetik egri chiziqning dastlabki ma'lumotlarga yuqoriroq darajada muvofiq kelishini ko'rsatdi. Shuningdek, razrezning fizik xususiyatlari chuqurlik bo'yicha o'zgarishini, xususan, zichlanish gradientini hisobga olish zarurligi qayd etildi. Olingan natijalardan lateral o'zgaruvchanlik sezilarli darajada bo'lmagan hollarda tadqiq etilayotgan konning boshqa quduqlarida akustik ma'lumotlarni qayta tiklashda foydalanish mumkin.

Kalit so'zlar: Akustik karotaj, seysmik modellash, geologik kesma, akustik karotajni qayta tiklash usuli, Zalyaev usuli, Faust usuli, mavjud quduq.

SELECTION OF THE OPTIMAL ACOUSTIC LOGGING RESTORATION METHOD FOR THE BUKHARA–KHIVA REGION BY COMPARING REAL AND SYNTHETIC CURVES

Gayratova Malika Zokirovna

Higher Education, Geophysicist Technician, JSC "Uzbekgeofizika", Tashkent, Uzbekistan

Abstract. The study addresses the reconstruction of missing or low-quality acoustic logging data for the Bukhara–Khiva region. The objective is to compare two approaches to synthetic acoustic curve construction, namely the Zalyaev and Faust methods, and to identify the approach providing the closest agreement with the original data from a reference well. Well logging data stored in a LAS file were processed using the Kamerton software. A synthetic curve was generated for each method and compared with the original acoustic curve using graphical analysis and correlation coefficients. The Zalyaev method produced a correlation coefficient of 0.84, whereas the Faust method yielded 0.88. The results indicate a closer agreement between the reconstructed and original curves when the Faust approach is applied. The study also emphasizes the need to account for changes in formation properties with depth, including the compaction gradient. The obtained results can be considered for reconstruction of acoustic data in other wells of the studied field provided that pronounced lateral variability is absent.

Keywords: acoustic logging, data reconstruction, synthetic curve, seismic modeling, geological section, Zalyaev method, Faust method, reference well, Bukhara–Khiva region.

Введение. Акустический каротаж относится к числу методов геофизических исследований скважин, информация которого используется для характеристики упругих свойств горных пород и последующей интерпретации геологического разреза. Практическая ценность акустических данных возрастает при построении моделей месторождений, уточнении строения продуктивных интервалов и выполнении работ по привязке сейсмических материалов к разрезу скважины. В рамках таких исследований необходимо располагать надежными значениями интервального времени или скорости распростра-

нения упругих волн.

Для старого фонда скважин характерна ситуация, при которой акустические диаграммы сохранились не полностью либо имеют качество, недостаточное для непосредственного использования. Восстановление отсутствующих интервалов позволяет снизить влияние неполноты архивных материалов на последующее геофизическое моделирование. Поэтому практическая задача заключается не только в получении синтетической кривой, но и в выборе такого способа её построения, который будет максимально согласован с реальными характеристиками исследуемого разреза.

В настоящей работе рассматриваются два подхода — метод Заляева и метод Фауста. Их сравнение выполняется на данных учебной скважины Бухара-Хивинского региона. Критерием выбора служит степень соответствия синтетической кривой исходной акустической кривой, оцениваемая посредством коэффициента корреляции.

Исходные данные и особенности акустического каротажа. Акустический каротаж основан на регистрации характеристик упругих волн, распространяющихся в около-скважинном пространстве. В зависимости от физических свойств пород скорость распространения волн изменяется, поэтому получаемая диаграмма содержит информацию, связанную с литологией, пористостью и особенностями строения массива. В практике ГИС акустические измерения применяются также при выделении зон трещиноватости и интервалов, представляющих интерес как коллекторы.

В исходной статье в качестве основных регистрируемых характеристик рассматриваются интервальное время, амплитуда колебаний и коэффициент поглощения (ослабления). Интервальное время характеризует продолжительность пробега волны на единицу длины. Амплитудная характеристика отражает энергию зарегистрированного сигнала на определенном расстоянии от источника, а коэффициент поглощения характеризует изменение амплитуды при распространении волн.

Акустические исследования выполняются как в необсаженных, заполненных жидкостью скважинах, так и в обсаженных скважинах. Радиус исследования в рассматриваемом методе ограничен и, согласно использованным литературным данным, составляет порядка 0,5–1 м от оси скважины [2].

Для восстановления данных принципиально важно учитывать, что акустическая характеристика определяется не одним параметром породы. На результат влияют литологический состав, степень уплотнения, пористость, характер насыщения и изменение свойств разреза с глубиной. Для иллюстрации различий скоростей продольных волн в различных средах приведены данные таблицы 1.

Таблица 1.

Скорость продольных волн в различных средах

Среда	Vp, 10 ³ м/с
Глина	1,2-2,5
Песчаник плотный	3-6
Известняк	3-7,1
Каменная соль	4,5-5,5
Кристаллические породы	4,5-6,5
Цемент	3,5
Сталь	5,2
Воздух	0,33
Нефть	1,3-1,4
Вода	1,5
Буровой раствор	1,5-1,7

Методика исследования. Исследование выполнено на учебной скважине Бухара-Хивинского региона. Исходные материалы были получены из LAS-файла и импортированы в программу «Камертон». Такая последовательность обработки позволила использовать имеющиеся диаграммы в едином рабочем пространстве и сопоставлять исходную акустическую кривую с результатами восстановления. Методы восстановления проводились по Бухара-Хивинскому региону в учебной скважине (рис 1).

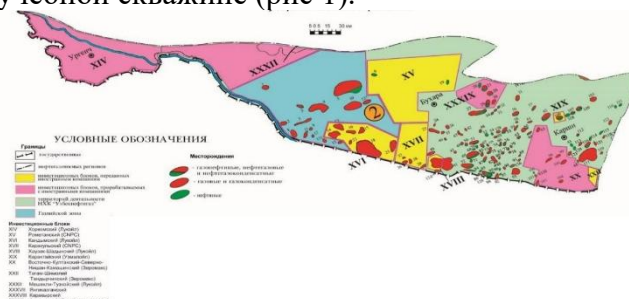


Рис.1. Схема размещения месторождений углеводородов и инвестиционных блоков Бухара-Хивинского региона [3].

Данные по скважине взяты из LAS-файла и переведены в программу Камертон (рис 2).

На первом этапе исследования был применен метод Заляева, основанный на установлении зависимости интервального времени продольной волны от показаний нейтронного каротажа с последующим подбором нормировочных коэффициентов [4]. Расчет интервального времени выполняется по формуле:

$$\Delta T_p = -90 \cdot \ln 10 N K - k + m \quad (1)$$

где ΔT_p — интервальное время продольной волны, мкс/м; NK — значения нейтронного каротажа, полученные при измерении, усл. ед.; k и m — нормировочные коэффициенты. С использованием данной формулы была построена синтетическая кривая. Значения нейтронного каротажа были взяты из LAS-файла (рис. 3). Нормировочные коэффициенты были вычислены по формуле $I_g \Delta T_p NK$.

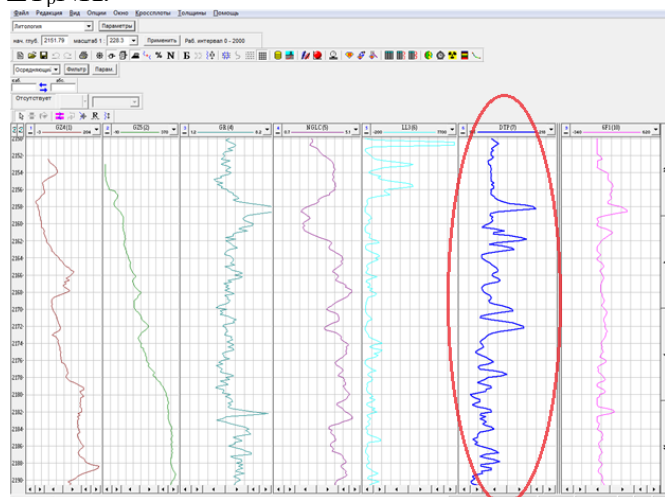


Рис.2. Исходные данные на программе Камертон.

Значения нейтронного каротажа были извлечены из исходного LAS-файла. После определения нормировочных коэффициентов была построена синтетическая кривая и выполнено её графическое сравнение с исходной акустической кривой. Дополнительной оценкой служил кросс-плот, по которому определялась линия тренда и рассчитывался коэффициент корреляции.

На втором этапе использован метод Фауста. Данный подход предполагает преобразование данных кажущегося удельного электрического сопротивления в представление, соответствующее акустическому каротажу, с подбором нормировочных коэффициентов [5]. Для расчетов использовались значения бокового каротажа, также полученные из LAS-файла. По рассчитанным параметрам была сформирована синтетическая акустическая кривая, которая затем сопоставлялась с исходной.

Сравнение двух методов проводилось по одному и тому же принципу: для каждого способа определялась степень согласия вос-

тановленной кривой с реальной кривой опорной скважины. Такой подход позволяет исключить оценку метода только по визуальному сходству и дополнить графический анализ количественным показателем корреляции.

Результаты применения метода Заляева. После расчета по методу Заляева была получена синтетическая акустическая кривая, построенная на основе нейтронного каротажа и соответствующих нормировочных коэффициентов. На этапе сопоставления синтетической и исходной кривых наблюдается выраженное сходство их общего характера изменения по глубине, однако отдельные интервалы демонстрируют расхождения.

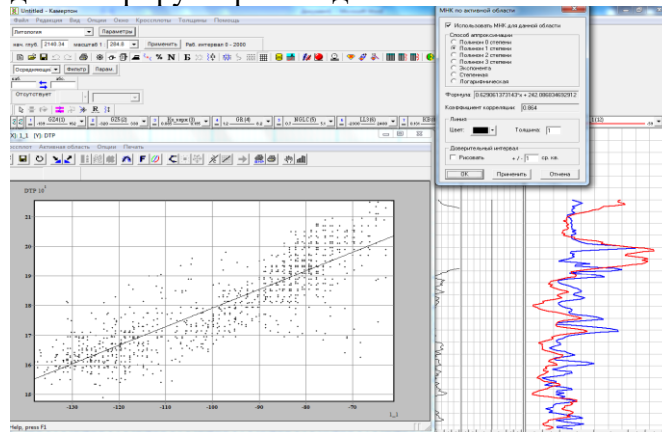


Рис.3. Сравнение исходной и синтетической кривых, полученная по методу Заляева. Синяя кривая – это исходная, красная – синтетическая.

Для количественной оценки взаимосвязи построен кросс-плот с линией тренда. Полученный коэффициент корреляции составил 0,84. Для рассматриваемой учебной скважины это свидетельствует о достаточно тесной связи между исходной и восстановленной кривыми и подтверждает возможность применения метода Заляева в качестве одного из вариантов реконструкции акустических данных.

Вместе с тем коэффициент 0,84 показывает, что восстановленная характеристика не полностью воспроизводит исходную кривую. Следовательно, использование только нейтронного каротажа не позволяет устранить все расхождения, возникающие при реконструкции акустического параметра в исследуемом разрезе.

Результаты применения метода Фауста.

На втором этапе исследования был применен метод Фауста, основанный на преобразовании данных кажущегося удельного электрического сопротивления в значения акустического каротажа путем подбора нормировочных коэффициентов [5]. Расчет интервального времени продольной волны выполняется по формуле:

$$\Delta T_p = \frac{a}{(\text{Depth} \cdot R_0)^b}, \quad (2)$$

где ΔT_p — интервальное время продольной волны, мкс/м; Depth — глубина, м; R_0 — сопротивление породы, Ом·м; а и b — нормировочные коэффициенты. Нормировочные коэффициенты были вычислены по формуле $\lg \frac{\Delta T_p}{R_0}$.

Применение метода Фауста выполнялось с использованием данных бокового каротажа из того же LAS-файла (рис. 4). После подбора нормировочных коэффициентов была рассчитана синтетическая акустическая кривая и проведено её сопоставление с исходными данными.

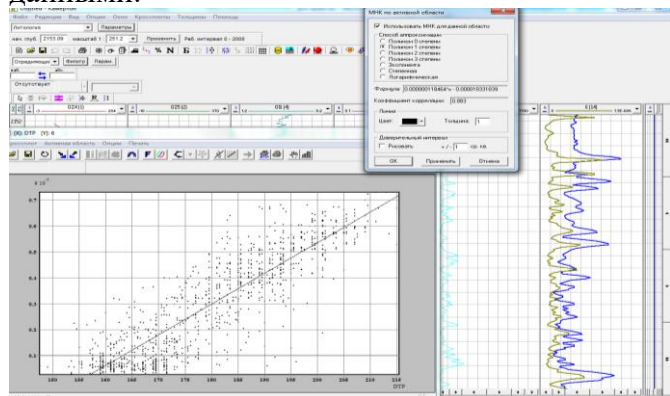


Рис.4. Сравнение исходной и синтетической кривых, полученная по методу Фауста.

Кросс-плот, построенный для результатов метода Фауста, дал коэффициент корреляции 0,88. По сравнению с результатом метода Залаяева значение корреляции оказалось выше на 0,04. Таким образом, для исследуемой скважины преобразование данных электрического каротажа по подходу Фауста обеспечило более близкое соответствие исходной акустической характеристике.

Полученный результат нельзя автоматически распространять на все скважины региона,

поскольку точность восстановления зависит от характера геологического разреза и взаимосвязи используемых геофизических параметров. Тем не менее для рассматриваемого объекта метод Фауста демонстрирует более высокий результат по выбранному критерию.

Сравнительный анализ. Для наглядного сопоставления результатов были объединены исходная акустическая кривая и две синтетические кривые, полученные по методам Залаяева и Фауста.

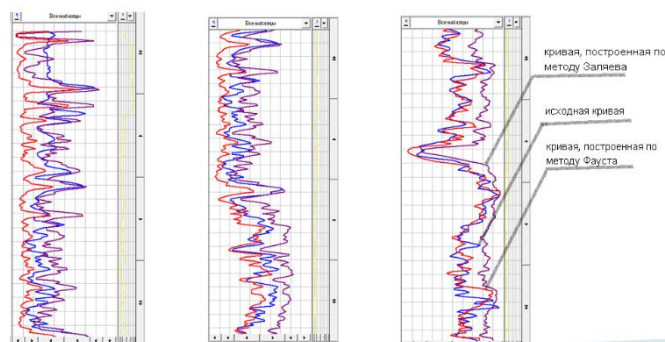


Рис.5. Сравнение исходной и синтетических кривых, по методам Залаяева и Фауста.

Сопоставление результатов показывает, что оба рассмотренных метода позволяют получить синтетическую кривую, коррелирующую с исходным акустическим каротажом. Однако количественный показатель для метода Фауста выше: 0,88 против 0,84 у метода Залаяева. Разность коэффициентов составляет 0,04, что в относительном выражении соответствует приблизительно 4,8% от результата метода Залаяева. В исходной работе это преимущество характеризовалось как 4% при сравнении полученных кривых.

Следовательно, при прочих равных условиях для рассматриваемой скважины предпочтительным является метод Фауста. Его преимущество проявляется именно в более тесном соответствии синтетической кривой исходным данным. При переносе методики на другие скважины необходимо предварительно оценивать устойчивость взаимосвязи между исходным электрическим каротажом и акустической характеристикой.

Отдельного внимания требует влияние уплотнения разреза с глубиной. Рассматриваемые методики в исходной постановке не

учитывают это изменение непосредственно, поэтому при расширении области применения целесообразно вводить поправку, связанную с градиентом уплотнения. Такая корректировка потенциально может повысить устойчивость восстановления на больших интервалах глубины, однако её количественный эффект в настоящем исследовании отдельно не оценивался.

Практическая значимость результатов. Полученный результат имеет практическое значение для работы со старым фондом скважин, в котором акустические данные могут отсутствовать полностью или частично. Если на скважине сохранились другие виды геофизических исследований, то восстановление акустической характеристики позволяет сформировать недостающий параметр без повторного проведения каротажа в уже недоступных или неэксплуатируемых интервалах.

Для условий исследуемого объекта рекомендуется рассматривать метод Фауста как приоритетный из двух протестированных подходов. При этом его использование на других скважинах должно сопровождаться контролем геологической сопоставимости и отсутствия сильной латеральной изменчивости. В противном случае коэффициенты, полученные для одной опорной скважины, могут не обеспечивать аналогичную точность на другом участке.

Практический эффект восстановления заключается не только в получении отдельной кривой. Восстановленные акустические данные могут использоваться как дополнительный материал при уточнении геологического разреза и сейсмического моделирования. Это снижает зависимость интерпретации от неполноты архивных данных и позволяет рациональнее

использовать уже имеющийся комплекс ГИС.

Заключение. В работе проведено сравнение двух методов восстановления акустического каротажа — метода Заляева и метода Фауста — на данных учебной скважины Бухара-Хивинского региона. Исходные материалы были получены из LAS-файла и обработаны в программе «Камертон». Для каждого метода сформирована синтетическая акустическая кривая и выполнено её сопоставление с исходной.

По результатам метода Заляева коэффициент корреляции составил 0,84. При использовании метода Фауста получено значение 0,88. Таким образом, на рассматриваемой скважине метод Фауста обеспечил более высокую степень соответствия восстановленной характеристики исходным данным.

На основании проведенного сравнения метод Фауста может быть рекомендован для дальнейшего восстановления акустического каротажа на других скважинах рассматриваемого месторождения при условии отсутствия сильной латеральной изменчивости. Одновременно при совершенствовании методики следует учитывать изменение степени уплотнения разреза с глубиной и оценивать влияние соответствующей поправки на качество восстановления.

Таким образом, результаты исследования показывают, что восстановление акустического каротажа по сохранившимся данным других методов ГИС является перспективным инструментом работы со старыми фондами скважин. При этом окончательный выбор алгоритма должен основываться на количественном сравнении синтетических и реальных кривых для конкретного геологического объекта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дахнов, В. Н. (1982). Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. Москва: Недра. 418 с.
- [2] Латышева, М. Г. (1991). Практическое руководство по интерпретации диаграмм геофизических методов исследования скважин (3-е изд.). Москва: Недра.
- [3] Бабаев, А. Г., & Гаврильчева, Л. Г. (1986). Соляно-ангидридовая формация верхней юры и нефтегазоносность нижележащей карбонатной толщи Средней Азии. Ташкент: Фан. 146 с.

- [4] Заляев, Н. З. (1990). Методика автоматизированной интерпретации геофизических исследований скважин. Минск: Университетское. 144 с.
- [5] Faust, L. Y. (1953). A velocity function including lithologic variation. Geophysics, 18(2), 271–288.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Гайратова, М. З. (2026). Выбор оптимального метода восстановления акустического каротажа для Бухара-Хивинского региона путем сравнения реальных и синтетических кривых. Sanoatda Raqamli Texnologiyalar (Digital Technologies in Industry), 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.36>

UO‘K: 552.3:551.21

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.37

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

XO‘JABARKU–MALYANGUR PALEOVULQONI ANDEZITLARI VA ULARNING TUFLARINING PETROGRAFIK XUSUSIYATLARI



Niyozov Dalir Botir o'g'li

H.M. Abdullayev nomidagi Geologiya va geofizika instituti DM,
muhandis-geolog, Toshkent, O'zbekiston
E-mail: niyozovdaler8@gmail.com
ORCID ID: 0009-0001-0113-8162
Science ID: MSR-0726-0105



Ikromov O'tkir Olimovich

H.M. Abdullayev nomidagi Geologiya va geofizika instituti DM,
kichik ilmiy xodim, Toshkent, O'zbekiston
E-mail: utkirikromov40@gmail.com
Science ID: MTV-0525-0104

Annotatsiya. Mazkur maqolada Janubiy O'zbekiston hududida tarqalgan Xo'jabarku–Malyangur paleovulqoni andezitlari va ularning tuflarining petrografik xususiyatlari o'rganilgan. Tadqiqotda tog' jinslarining makroskopik va mikroskopik belgilari, mineral tarkibi, strukturasi, teksturasi, porfirli ajralmalari hamda ikkilamchi o'zgarishlari tahlil qilingan. Andezit, andezibazalt, kvarsli andezit, andezidatsit va tufogen jinslarning petrografik xususiyatlari polarizatsion mikroskop yordamida o'rganilgan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, o'rganilgan vulkanogen jinslarda plagioklaz, amfibol, kvars va boshqa minerallar ishtirok etishi, asosiy massada esa mikrolitli, gialopilitli, intersertal va pilotaksitli strukturalar rivojlanganligi aniqlangan. Ayrim minerallarda sossyuritlashish, xloritlashish, epidotlashish, karbonatlashish va seritsitlashish kabi ikkilamchi o'zgarishlar qayd etilgan. Olingan petrografik ma'lumotlar Xo'jabarku–Malyangur paleovulqonidagi vulkanik jarayonlarning rivojlanish xususiyatlari va vulkanogen jinslarning shakllanish sharoitlarini aniqlashtirish uchun muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: Xo'jabarku–Malyangur paleovulqoni, andezit, andezibazalt, kvarsli andezit, andezidatsit, tuf, petrografiya, plagioklaz, amfibol, vulkanogen jinslar.

Received: 28.08.2026

Accepted: 18.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АНДЕЗИТОВ ПАЛЕОВУЛКАНА ХОДЖАБАРКУ–МАЛЯНГУР И ИХ ТУФОВ

Ниёзов Далир Ботир угли

ДМ «Институт геологии и геофизики имени Х.М.
Абдуллаева», инженер-геолог, Ташкент, Узбекистан

Икромов Уткир Олимович

ДМ «Институт геологии и геофизики имени Х.М.
Абдуллаева», младший научный сотрудник, Ташкент,
Узбекистан

Аннотация. В статье изучены петрографические особенности андезитов и их туфов Ходжабарку–Малянгурского палеовулкана, распространённого на территории Южного Узбекистана. В процессе исследования проанализированы макроскопические и микроскопические признаки горных пород, их минеральный состав, структура, текстура, порфировые выделения и вторичные изменения. Петрографические особенности андезитов, андезибазальтов, кварцевых андезитов, андезидацитов и туфогенных пород изучены с использованием поляризационного микроскопа. Установлено, что в исследованных вулканогенных породах присутствуют

плаггиоклаз, амфибол, кварц и другие минералы, а в основной массе развиты микролитовая, гиалопилитовая, интерсерральная и пилотакситовая структуры. В отдельных минералах отмечены вторичные изменения в виде сосюритизации, хлоритизации, эпидотизации, карбонатизации и серицитизации. Полученные петрографические данные имеют важное значение для уточнения особенностей развития вулканических процессов и условий формирования вулканогенных пород Ходжабарку–Маянгурского палеовулкана.

Ключевые слова: Ходжабарку–Маянгурский палеовулкан, андезит, андезибазальт, кварцевый андезит, андезидацит, туф, петрография, плаггиоклаз, амфибол, вулканогенные породы.

PETROGRAPHIC CHARACTERISTICS OF THE ANDESITES AND TUFFS OF THE KHOJABARKU–MALYANGUR PALEOVOLCANO

Niyozov Dalir Botir ugli

Institute of Geology and Geophysics named after H.M. Abdullaev,
Engineering Geologist, Tashkent, Uzbekistan

Ikromov O'tkir Olimovich

Institute of Geology and Geophysics named after H.M. Abdullaev,
Junior Researcher, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. This article presents a petrographic study of the andesites and their tuffs of the Khojabarku–Malyangur paleovolcano, which is distributed in Southern Uzbekistan. The study analyzes the macroscopic and microscopic characteristics of the rocks, including their mineral composition, structure, texture, porphyritic phenocrysts, and secondary alterations. The petrographic characteristics of andesites, andesibasalts, quartz andesites, andesidacites, and tuffaceous rocks were investigated using a polarizing microscope. The results show that the studied volcanic rocks contain plagioclase, amphibole, quartz, and other minerals, while microlitic, hyalopilitic, intersertal, and pilotaxitic structures are developed in the groundmass. Secondary alterations, including saussuritization, chloritization, epidotization, carbonatization, and sericitization, were identified in individual minerals. The obtained petrographic data provide an important scientific basis for clarifying the characteristics of volcanic processes and the formation conditions of volcanic rocks within the Khojabarku–Malyangur paleovolcano.

Keywords: Khojabarku–Malyangur paleovolcano, andesite, andesibasalt, quartz andesite, andesidacite, tuff, petrography, plagioclase, amphibole, volcanic rocks.

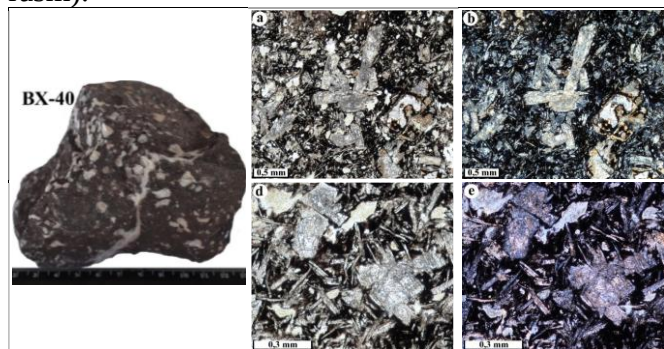
Kirish. Xo'jabarku–Malyangur paleovulqoni erta karbon yoshidagi vulkanogen formatsiyalar vulkanik orollar yo'ylariga yaqin sharoitda vujudga kelganligini tahmin qilish mumkin. Buni vulqon jinslarni dengiz cho'kindilari – terrigen va karbonat jinslar qatlamlari bilan ritmik almashinib yotganligi tasdiqlaydi. Vulqon faolligining namoyon bo'lishi turlicha kechganligi (uning mahsulotlarini o'tilib yoki oqib chiqishi) tuf, tufobrekchiya, aglomeratlar (eksploziv fatsiya), lava va lavobrekchiyalar (effuziv fatsiya), eruptiv dayka va inyeksion tuffizitlar (ekstruziv fatsiya) kabi vulqon jinslarining har xil fatsiyalarini shakllanganligi bilan ifodalangan. Yerning chuqur qismidan yer yuzasiga portlab o'tilib yoki oqib chiqishi natijasida hosil bo'lgan vulqon mahsulotlari bilan bir qatorda yer yuzasiga chiqmagan vulqon jinslari (subvulkanik fatsiya) ham keng tarqalgan. Mintaqadagi barcha paleovulqon qurilmalarida

andezit-datsit va riolit porfirlarning ko'p sonli sill va yirik lakkolitsimon tanalari uchraydi [1]. Ushbu maqolada yuqoridagi jinslarning petrografik xususiyatlari makroskopik, mikroskopik tekshiruv usullari yordamida o'rganilib yoritilgan.

Tadqiqot metodikasi. Tadqiqotlar Xo'jabarku–Malyangur paleovulqoni hududidan olingan tog' jinslari namunalari asosida olib borildi. Namuna olish jarayonida vulkanogen jinslarning turli fatsiyalariga mansub andezitlar, andezibazaltlar, kvarsli andezitlar, andezidatsitlar va tufogen jinslar (tuflar, tufolavalar) qamrab olindi. Petrografik tadqiqotlar makroskopik va mikroskopik usullar yordamida amalga oshirildi. Makroskopik tavsiflashda jinslarning rangi, teksturasi, strukturasi, porfirli ajrilmalarining mavjudligi va ikkilamchi o'zgarish belgilari aniqlandi. Mikroskopik tadqiqotlar uchun shliflar (ingichka kesmalar) tayyorlanib, polarizatsion

mikroskop ostida o'rganildi. Shliflarda mineral tarkibi, porfirli fenokristallar (plagioklaz, amfibol, kvars va boshqalar), asosiy massaning strukturasi (mikrolitli, gialopilitli, intersertal, pilotaksitli), tekstura xususiyatlari hamda ikkilamchi o'zgarishlar (sossyuritlashish, xloritlashish, epidotlashish, karbonatlashish, seritsitlashish) batafsil tavsiflandi. Tadqiqot davomida B40 (bazalt), BX-86 (andezibazalt), BX-139 (andezit-porfir), BX-211 (andezit), BX-173 (andezidatsit), BX-119 (andezit tarkibli tufolava) va boshqa namunalardan tayyorlangan shliflar tahlil qilindi.

Bazaltlar asosan massiv, ba'zan bodomsimon teksturalarga ega. To'liq kristallashmagan asos massasidan plagioklazlar, kam hollarda amfibollarning kuchli o'zgarishga uchragan - epidotlashgan va xloritlashgan porfir donalari ajralib turadi. Tog' jinsining asosiy massasi (bazisi) mikrolitli, gialopilitli, intersertal strukturali. Ayrim holatda intensiv xloritlashgan, karbonatlashgan (1-rasm).



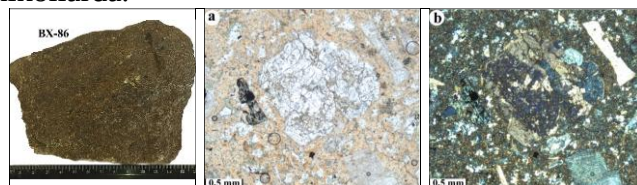
1-rasm. Bazaltning petrografik xususiyatlari.

Shlif № BX-40. a va b – tog' jinsining asosiy massasi intersertal tuzilishga ega. Kuchsiz porfir ajralmalari karbonatlashgan amfibol psevdomorfozalaridan va plagioklazdan iborat; a va d – parallel nikollarda tasvirga olingan, b va e – kesishgan nikollarda.

Xo'jabarku-Malyangur paleovulqoni **andezibazaltlari** porfirli ko'rinishga ega (2 - rasm). Porfir ajralmalari sossyuritlashgan plagioklazdan va xloritga aylangan amfibol psevdomorfozalaridan iborat, shuningdek, oksidlangan sulfid minerallari donalarining uyasimon to'plamlari uchraydi.

Shlif № BX-86. Strukturasi porfirli, plagioklaz va xloritlashgan qoramtir minerallar (amfibol va piroksen) zich joylashgan. Plagioklaz ingichka yoki qalin polisintetik qo'shaloqlarga ega,

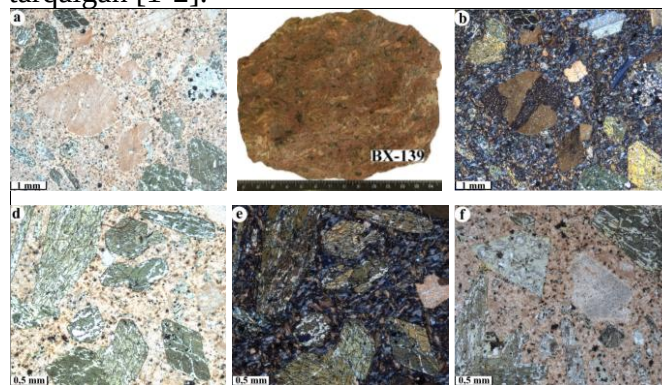
turli darajada sossyuritlashgan; qoramtir mineral (amfibol va piroksen) to'q yashil xloritga o'zgargan. Asos massasi pilotaksitli, zich joylashgan plagioklaz mikrolitlaridan tashkil topgan.; a – parallel nikollarda tasvirga olingan, b – kesishgan nikollarda.



2-rasm. Andezibazalt.

Andezibazaltlarning chala kristallashgan asosiy massasida plagioklazning ingichka prizma shaklidagi leystlari (mikrolitlari) tartibsiz joylashgan. Ularni orasida amfibol mikrolitlari bo'yicha rivojlangan xlorit-karbonatli ikkilamchi mineral agregatlari rivojlangan. Asosiy massasida gialopilitli, mikrolitli strukturalar tez-tez uchraydi.

Kvarsli andezitlar ham ko'pincha porfirli strukturaga ega. Fenokristallari sossyuritlashgan plagioklazdan iborat bo'lib, u kvars fenokristallariga nisbatan 5-6 marta ko'p. Umuman tog' jinsi hajmida plagioklaz+kvars porfir ajralmalari 20-25% atrofida. Amfibolni porfir ajralma hosil qilgan donalari juda siyrak (2-3%) tarqalgan [1-2].

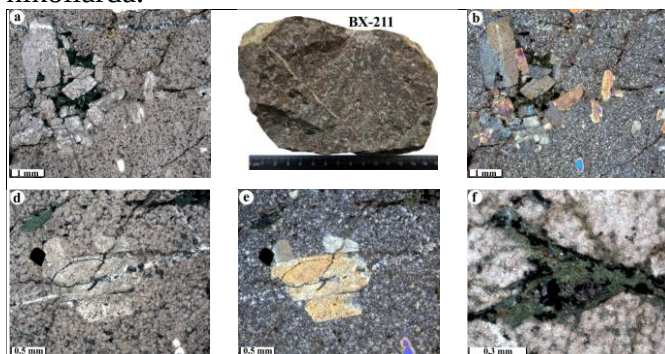


3-rasm. Andezit-porfir.

Asos massasida ushbu minerallarning mikrolitlari bilan birga qisman vulkanik shisha mavjud, shuning uchun uning strukturasi chala kristallangan, mikrolitli deb ta'riflash mumkin. Asos massasi chala kristallangan, unda vulqon shishasi mikrolitlarga nisbatan yaqqol ustunlik qiladi. Unda mikropegmatitning ksenolitlari aniqlangan. Xo'jabarku-Malyangur paleovulqonidagi ba'zi andezit-porfir, andezidatsit-porfir

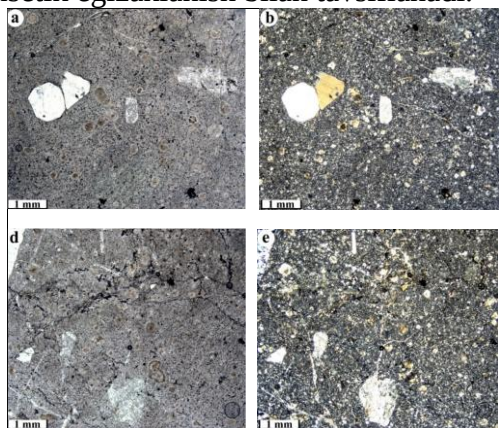
va andezidatsitlar mikroporfirli, porfirli strukturalarga ega.

Shlif № BX-139. Tog' jinsining strukturasida porfirli, asos massasi mikrolitli, cho'ziq, oz miqdorda kesishgan plagioklaz mikrolitlaridan tashkil topgan; Ularning orasidagi bo'shliqlarda xlorit, tarqoq ma'danli minerallar va epidot va seritsitlar uchraydi. Porfirli ajrilmalar sosyuritlashgan asos plagioklaz va xloritlashgan rogovaya obmankadan iborat; a, d va f – parallel nikollarda tasvirga olingan, b, e – kesishgan nikollarda.



4-rasm. Andezit Shlif № BX-211.

Tog' jinsining strukturasida porfirli, mayda donali asosiy massa fonida yirik fenokristallar aniq ajralib turadi. Tog' jinsining teksturasida asosan massiv bo'lib, ayrim joylarda mikroyoriqlar va ikkilamchi o'zgarish belgilari kuzatiladi. Mineralogik tarkibida asosiy o'rinni plagioklaz fenokristallari egallaydi. Plagioklaz kristallari yarim idiomorf shaklda bo'lib, 1 nikolda rangsiz, past relefli ko'rinishda namoyon bo'ladi, 2 nikolda esa past va o'rta interferensiya ranglari hamda aniq polisintetik egizaklanish bilan tavsiflanadi.



5-rasm. Andezidatsit afir tuzilishli Shlif № BX-173.

Andezidatsitlar afir tuzilishli bo'lib, jinsning asosiy massasida yirik porfir ajrilmalari deyarli kuzatilmaydi. Mikroskop ostida tog' jinsining asosiy massasi juda mayda donali, mikrolitli va qisman kristallangan tuzilishga ega ekanligi ko'rinadi (5-rasm).

Asosiy massa tarkibida mayda plagioklaz mikrolitlari tartibsiz yoki qisman subparallel yo'nalishda joylashgan bo'lib, ular orasidagi bo'shliqlar mayda kristallangan vulkanik massa bilan to'ldirilgan. Ayrim joylarda vulkanik shishaning saqlanib qolgan qoldiqlari kuzatiladi. Plagioklazning alohida mayda donalari yorqin interferensiya ranglari va polisintetik egizaklanishi bilan ajralib turadi. Ba'zi donalarda ikkilamchi o'zgarishlar, xususan, sosyuritlanish, seritsitlanish belgilari kuzatiladi. Qoramtir rangli minerallar juda mayda donalar yoki ikkilamchi mineral agregatlari ko'rinishida uchraydi. Jinsning ayrim qismlarida mayda, dumaloq va notekis shakldagi bo'shliqlar hamda ularni to'ldiruvchi ikkilamchi mineral agregatlari kuzatiladi. Ushbu paleovulqonlardagi vulkanik fatsiyalar tog' jinslarida va ular bo'yicha rivojlangan metasomatitlarda 52 ta turga mansub minerallar aniqlangan bo'lib, ma'dan shakllantiruvchi asosiy mineral lari: pirit, sfalerit, galenit, xalkopirit, magnetit, titanomagnetit, ilmenit, rutil v.b.; noma'dan mineral lari – kvars, plagioklaz, kaliy shpati, seritsit, xlorit, karbonat v.b. minerallardan iborat [5].

Xo'jabarku-Malyangur paleovulqonida ularning eksploziv fatsiyasiga mansub yirik bo'lakli tuflar ehtimoliy vulqon otilish markazlari (bo'g'zilar) va parazit kanallari atrofida aniqlangan. Bo'laklarining o'lchamiga ko'ra tufogen jinslar yirik bo'lakli (2–10 mm), o'rta bo'lakli (0,1–2 mm) va mayda bo'lakli (0,01–0,1 mm) ga bo'linadi.

Eksploziv fatsiya jinslari turli xil bo'lib, tufolavalardan, ignimbritlardan, lavobrekchiyalardan, aglomeratli lavalardan iborat, ya'ni ular vulqon jarayonlarini kuchli portlashlar bilan kechganligidan, lavalarni o'ta qovushqoqligidan dalolat beradi. Biz "tufolava" atamasini izohlashda B.S.Koptev-Dvornikov v.b. [4] ta'rifiga asoslanamiz, ya'ni bu jinslar flyuidal teksturali o'rta va nordon lavalardan iborat bo'lib, ularning ichida xuddi shu tarkibli lavaning bo'laklaridan tuzilgan

linzalar, qatlamchalar uchraydi (6-rasm). Ularni hosil bo'lish jarayonlarini lava oqayotgan vaqtda chuqurda hosil bo'lgan porfir ajralmalarini va lavaning yuzasini tez sovub qotishidan shakllangan vulkanik shishalarini sinishi va maydalanishi bilan izohlash mumkin.



6-rasm. BX-119 namunasi — andezit tarkibli tufolava.

Jins to'q kulrang–kulrang-yashilimsimon rangda, zich va yaxlit tuzilishga ega. Asosiy massa mayda donali bo'lib, unda notekis shakldagi vulkanogen bo'laklar va mineral agregatlari ajralib turadi. Jinsning ayrim qismlarida sarg'ish-qo'ng'ir rangli zonalarining mavjudligi ikkilamchi o'zgarishlar va temirli minerallarning oksidlanishidan dalolat beradi.

Tuflar – vulqon bo'g'ziga nisbatan tarqalishiga ko'ra uchta zonaga xos bo'lgan turli xil piroklastolitlardan iborat: vulqon bo'g'zi atrofi, oraliq (vulqon konusining yon bag'irlari) va vulqon bo'g'zidan uzoqda [2]. Vulkanitlarning asosiy massasi, ayniqsa piroklastlar, ular shakllanishidan boshlab eroziyaga uchraganligi sababli, ushbu jinslar otilish markazidan unchalik uzoq bo'lmagan masofada joylashganligini ko'rishimiz mumkin.

Bo'laklarining katta-kichikligiga ko'ra tufogen jinslar yirik bo'lakli (2–10 mm), o'rta bo'lakli (0,1–2 mm) va mayda bo'lakli (0,01–0,1 mm) turlarga ajratiladi.

Tuflarning asosiy farqlanuvchi xususiyati ularning bog'lovchi (sementlovchi) massasining

tabiatidir. Tog' jinslarining umumiy strukturasi kristalloklastik, litokristalloklastik bo'lib, ularni tashkil etuvchi bo'laklarning o'lchamiga qarab psammitli yoki alevritli, lekin bog'lovchi massa asosan turli darajadagi erib-toblangan kuldan iborat [3](Dolimov T.N. 1971).

Xulosa. Xo'jabarku–Malyangur paleovulqoni hududida tarqalgan andezitlar va ularni tuflarning petrografik xususiyatlarini o'rganish natijasida ularning mineral tarkibi, strukturasi va teksturasiga oid muhim ma'lumotlar olindi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, andezitlar asosan porfirli va mikroporfirli strukturalarga ega bo'lib, fenokristallar tarkibida plagioklaz ustunlik qiladi. Amfibol minerallari esa turli darajada xloritlashish, epidotlashish va karbonatlashish jarayonlari ta'sirida ikkilamchi o'zgarishlarga uchragan.

Tog' jinslarining asosiy massasi mikrolitli, gialopilitli hamda ayrim hollarda intersertal strukturaga ega bo'lib, vulqon shishasi va mikrolitlarning saqlanib qolganligi magmaning yer yuzasiga chiqish jarayonida tez soviganligini ko'rsatadi. Kvarsli andezitlarda plagioklaz fenokristallari kvarsqa nisbatan sezilarli darajada ustunlik qilishi hamda mikropegmatit ksenolitlarining uchrashi magmatik tizimning murakkab evolutsiyasidan dalolat beradi.

Paleovulqonning eksploziv faoliyati natijasida hosil bo'lgan tuflar, tufolavalalar, ignimbritlar va lavobrekchiylar tarkibida kuzatilgan litologik va petrografik belgilar vulkanizmning kuchli portlash bosqichlari bilan kechganligini tasdiqlaydi. Piroklastik jinslarning tarkibi va tuzilishi ularning vulqon otilish markazlariga yaqin sharoitda shakllanganligini ko'rsatadi. Olingan petrografik ma'lumotlar Xo'jabarku–Malyangur paleovulqoni vulkanitlarining hosil bo'lish sharoitlari va magmatik rivojlanish bosqichlarini aniqlashtirishda muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi. Tadqiqot natijalari Janubiy O'zbekiston paleovulkanik majmualarining geologik rivojlanish tarixini tiklash, vulkanogen formatsiyalarni qiyosiy tavsiflash hamda keyingi mineralogik, geokimyoviy va metallogenik tadqiqotlarni olib borishda muhim manba hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Шаякубов, Т. Ш., Далимов, Т. Н., Арапов, В. А., Шпотова, Л. В., & Коржаев, В. П. (1988). Вулканизм Западного Тянь-Шаня. Ташкент: Фан. 328 с.

-
- [2] Малеев, Е. Ф. (1964). Вулканокластические горные породы. Москва: Госгеолтехиздат. 168 с.
- [3] Далимов, Т. Н., Кустарникова, А. А., Ярмухамедов, А. Р., et al. (1971). Вулканогенные формации Узбекистана. Ташкент: Фан. 280 с.
- [4] Коптев-Дворников, В. С., et al. (1967). Вулканогенные породы и методы их изучения. Москва: Недра. 324 с.
- [5] Mamarozikov, U. D., Hamrayev, A. X., Saitov, N. E., Normatov, O'. A., & Ikromov, O'. O. (2025). Hisor tog'ining janubi-g'arbiy tarmoqlarida rivojlangan erta karbon davri vulkanogen hosilalarining aksessor-mineralogik ixtisoslashuvi. Geologiya va mineral resurslar, (5), 34–46.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Niyozov, D. B., & Ikromov, O. O. (2026). Xo'javar-ku-Malyangur paleovolqoni andezitlari va ularning tuflarining petrografik xususiyatlari. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.37>

KIMYOVIY TEXNOLOGIYA VA QURILISH
ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВО
CHEMICAL TECHNOLOGY AND CONSTRUCTION

UDC: 553.674:661.183.2:628.349

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.8

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

SELECTION AND EVALUATION OF PROMISING BENTONITE DEPOSITS
FOR THE PRODUCTION OF SORPTION MATERIALS USED IN
INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT



**Husenov Abdurasul
Uktamovich**

Independent Researcher, Jizzakh
Polytechnic Institute, Jizzakh,
Uzbekistan
E-mail:

abdurasulhusenov4@mail.ru
ORCID ID: 0009-0004-4255-6266



**Xadjibayev Diyor
Asadullayevich**

Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Jizzakh
Polytechnic Institute, Jizzakh,
Uzbekistan
E-mail:

diyorxadjibayev@gmail.com
ORCID ID: 0009-0007-1273-6153



**Sabirov Baxtiyor
Toxtayevich**

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Jizzakh Polytechnic
Institute, Jizzakh, Uzbekistan
E-mail: bentosb@rambler.ru
ORCID ID: 0009-0007-1273-6153

Abstract. This paper investigates the selection and evaluation of promising bentonite deposits for the production of sorption materials intended for industrial wastewater treatment. The mineralogical composition and physicochemical properties of bentonite raw materials were analyzed, and their influence on adsorption performance was assessed. The results demonstrate that locally available bentonite deposits possess high sorption potential and can be effectively used for manufacturing sorbents capable of removing heavy metals and other pollutants from industrial wastewater, thereby improving environmental safety and resource efficiency.

Keywords: bentonite, bentonite deposit, sorbent, adsorption, industrial wastewater, water treatment, mineral raw materials, physicochemical properties, environmental safety.

Received: 20.07.2026

Accepted: 06.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

ВЫБОР И ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
БЕНТОНитОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СОРБЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ОЧИСТКИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

**Хусенов Абдурасул
Уктамович**

Независимый исследователь
Джизакского политехнического
института, Джизак,
Узбекистан

**Хаджибаев Диёр
Асадуллаевич**

Доктор философии по
техническим наукам (PhD),
Джизакский политехнический
институт, Джизак, Узбекистан

**Сабиров Бахтиёр
Тохтаевич**

Доктор технических наук,
профессор,
Джизакский политехнический
институт, Джизак, Узбекистан

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы выбора и оценки перспективных месторождений бентонитового сырья для получения сорбционных материалов, предназначенных для очистки промышленных сточных вод. Проведён анализ минералогических и физико-химических свойств бентонитов и дана оценка их влияния на сорбционные характеристики материалов. Результаты исследования показали, что местное бентонитовое сырьё обладает высокими адсорбционными свойствами и может эффективно использоваться при удалении тяжёлых металлов и других загрязняющих веществ из промышленных сточных вод.

Ключевые слова: бентонит, месторождение бентонита, сорбент, адсорбция, промышленные сточные воды, очистка воды, минеральное сырьё, физико-химические свойства, экологическая безопасность.

SANOAT OQOVA SUVLARINI TOZALASH UCHUN BENTONIT ASOSIDAGI SORBSION MATERIALLARNI OLISHDA ISTIQBOLLI XOM ASHYO KONLARINI TANLASH VA BAHOLASH

**Husenov Abdurasul
O'ktamovich**

Jizzax politexnika institutining
mustaqil tadqiqotchisi, Jizzax,
O'zbekiston

**Xadjibayev Diyor
Asadullayevich**

Texnika fanlari bo'yicha falsafa
doktori (PhD), Jizzax politexnika
institut, Jizzax, O'zbekiston

**Sabirov Baxtiyor
To'xtayevich**

Texnika fanlari doktori, professor,
Jizzax politexnika instituti, Jizzax,
O'zbekiston

Annotatsiya. Maqolada sanoat oqova suvlarini samarali tozalash uchun bentonit asosidagi sorbsion materiallar ishlab chiqarishda foydalanilishi mumkin bo'lgan istiqbolli bentonit konlari tanlash va baholash masalalari o'rganilgan. Bentonit xom ashyosining mineralogik va fizik-kimyoviy xossalari tahlil qilinib, ularning adsorbsion samaradorlikka ta'siri baholangan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, mahalliy bentonit konlaridan olinadigan xom ashyo yuqori sorbsion xususiyatlarga ega bo'lib, sanoat oqova suvlarini og'ir metallar va boshqa ifloslantiruvchi komponentlardan tozalash uchun samarali sorbentlar ishlab chiqarishda istiqbolli manba ekanligi asoslangan.

Kalit so'zlar: bentonit, bentonit koni, sorbent, adsorbsiya, sanoat oqova suvlari, suvni tozalash, mineral xom ashyo, fizik-kimyoviy xossalari, ekologik xavfsizlik.

Introduction. Although the use of synthetic adsorbents in industrial wastewater treatment is effective, their use in this field is relatively expensive due to their high cost, complexity, and selectivity of regeneration processes. Therefore, it is important to search for effective natural materials and opportunities for their use for wastewater treatment.

Bentonites, also known as "bentonite clays," are a type of clay consisting mainly of smectite group minerals that disperse in water to a colloidal state [1]. Bentonites are representatives of a class of highly dispersed aluminosilicate polymineral

minerals, which possess crystal size at a level of less than 1 μm and, accordingly, a large specific surface area and exchange capacity. Bentonite clays were formed during the later stages of geological history, approximately 140 million years ago. According to geological data, all identified large deposits of bentonite clays were formed by the underwater decomposition of volcanic ash and tuffs, which is confirmed by the location of bentonites in zones of high volcanic activity within the Earth's crust. According to geologists' estimates, in the deposits of bentonite clays considered economically and industrially suitable for extraction, there are

deposits of bentonite clays ranging from several thousand to several million tons, and the length of their sections can reach several kilometers [1].

As is known [2], bentonite clays (bentonites) are fine-dispersed clays, the main components of which are clay minerals of the smectite group - montmorillonite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) and beidellite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Minerals of the smectite group exhibit high binding capacity, exchange capacity, adsorption, and catalytic activity. The composition of bentonite clays is accompanied by mixed-layered minerals, hydrosilicates, palygorskite, illite, zeolites, quartz, kaolinite, galloisite, etc., in the form of impurities. Bentonite clays of various deposits and their individual areas differ in their external (visual) characteristics, chemical-mineralogical composition, as well as physicochemical properties, the color of which varies weakly from white to light green, light blue, cream, and has a yellowish-pink tint.

The structure of the bentonite framework based on the rock-forming mineral montmorillonite, the formula of which can be represented as $\text{Al}_2\text{O}_3 \times 4\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$, also plays a significant role [3]. It is precisely this general structure that predetermines the physical and technical properties of bentonite clay.

In the sources [4, 5] presents the results of a systematic study of the sorption properties of natural materials in the extraction of petroleum products of various natures. To improve the quality of oil water purification, the authors developed combined multilayer sorbents that allow for the production of oil mixtures of a wide dispersion with a purification level of 92-98%.

Natural minerals such as bentonite (montmorillonite), kaolinite, biotite, vermiculite glauconite are considered effective and promising in softening industrial effluents and removing heavy metals [6-10]. This is due to the fact that natural minerals are called promising because they are relatively inexpensive and in sufficient quantities, and their performance properties are high enough.

The adsorption properties of natural minerals are explained by their chemical, mineralogical composition, as well as the structure of the crystals and the dispersion of the particles [11-23]. The main chemical components in them are SiO_2 (30-70%), Al_2O_3 (10-40%) and H_2O (5-10%), with a specific

surface area of up to $500\text{m}^2/\text{g}$.

In the work of the authors [12-23] the adsorption of heavy metals in tourmaline consisting of aluminosilicates was studied. Tourmaline is a complex aluminosilicate with selective adsorption properties.

Methods and materials. Bentonite clay samples from the Nurata, Azkamar, and Navbakhor deposits were selected for the study. X-ray analysis of the chemical and mineralogical composition of the samples was conducted, and their fractional composition was determined.

Results and discussion. The main problem in the treatment of wastewater contaminated with various organic substances, especially at basalt fiber production plants, is the cost of sorbents used for purification, the cost of ion exchangers, and the fact that they are mainly imported. Taking this into account, we conducted research on the use of natural bentonite clay for the purification of wastewater from organic pollutants.

To study the physicochemical properties of bentonite clays from various deposits in our republic, samples of bentonite clays were imported from the Nurata, Azkamar, and Navbakhor deposits, and their physicochemical properties, including chemical and mineralogical composition, were studied and compared. The reserves of these deposits are sufficient and have the potential for industrial development.

Table 1
Chemical composition of bentonite samples from various deposits

№	Mineralogical composition of the sample	Mineral content in bentonite, %		
		Bentonite of the Nurata deposit	Bentonite of the Azkamar deposit	Bentonite of the Navbakhor deposit
1	SiO_2	55,15	56,23	45,73
2	TiO_2	0,62	0,61	0,36
3	Al_2O_3	14,17	13,56	7,24
4	Fe_2O_3	9,03	2,50	3,30
5	MgO	2,22	3,76	3,42
6	CaO	0,30	0,69	15,1
7	Na_2O	2,20	4,98	0,93
8	K_2O	1,54	2,20	0,92
9	P_2O_5	0,11	0,92	0,66
10	SO_3	0,10	0,49	0,49
11	FeO	-	-	-
12	Others	13,76	14,06	21,85

The chemical composition of bentonite clay samples obtained from various selected deposits was determined by X-ray fluorescence; the analysis results are presented in Table 1. From the above data, it can be concluded that the chemical

composition of natural bentonite clays in the sampled deposits is close to each other, and the bentonite of the Nurata deposit is more promising than other deposits; the amount of aluminum oxide in this sample, which plays an important role in the sorption process, is relatively high, and the composition of the main elements differs slightly from that of other deposits.

The phase composition of the bentonite clay of the Azkamar deposit according to the X-ray diffraction pattern (Fig. 1) is primarily represented by montmorillonite $d=0.44$; 0.32 ; 0.256 ; 0.246 ; 0.167 ; 0.149 nm. X-rays also show $d=1.26$; 1.05 nm, as well as quartz lines $d=0.427$; 0.335 ; 0.199 and 0.182 , indicating the sandiness of the bentonite clay. On the X-ray diffraction patterns of Azkamar bentonite, the lines of the high-alumina form of montmorillonite corresponding to baidelite are also observed at $d=0.725$ and 0.169 nm.

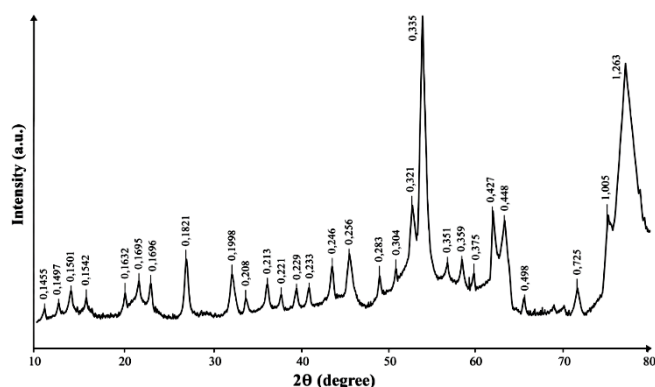


Fig.1. X-ray of a sample of white bentonite from the Azkamar deposit.

X-ray phase studies of bentonite samples from the Nurata and Navbakhor deposits (Fig. 1). 2-3) also indicates the presence of characteristic lines corresponding to montmorillonite at $d=1.52$; 0.714 ; 0.448 ; 0.412 ; 0.249 nm, etc. In the samples of their Bolgali manifestations, the lines corresponding to the illite are $d=0.384$; 0.308 ; 0.288 nm and others. X-ray diffraction patterns of bentonite samples from the Navbakhor deposit: $d=0.304$, excluding lines corresponding to montmorillonite; 0.227 and 0.151 nm, which indicates their proximity to Palygorskite clays.

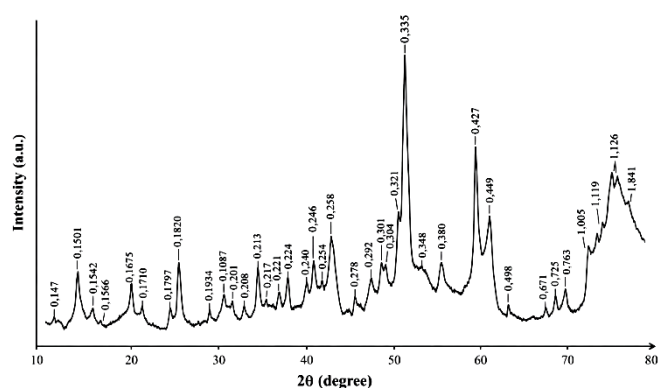


Fig.2. X-ray of a bentonite sample from the Nurata deposit.

The results of the study of the physicochemical properties of various natural bentonite clays in our republic showed that, despite the adsorption activity of these natural minerals, they are unsuitable for natural water treatment due to spontaneous peptization and decomposition in an aqueous medium. Furthermore, natural bentonite clay contains up to 40% of ballast mineral additives that do not participate in the sorption process and reduce the overall efficiency of the sorption material.

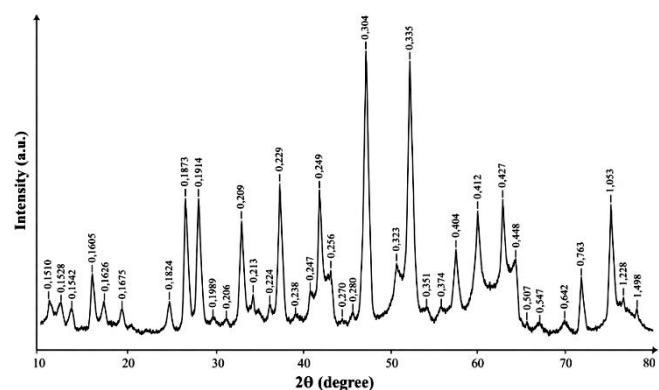


Fig.3. X-ray diffraction pattern of a Paligorskite sample from the Navbahor deposit.

Therefore, to bring the application of sorption materials based on bentonite clay to an industrial scale, it is first necessary to process and modify them. To do this, it is first necessary to dry and classify the natural bentonite clay. For this purpose, we selected Nurata bentonite clay, which is most suitable for further research and contains potassium ions easily exchangeable during sorption and calcium ions easily exchangeable during modification.

To prepare a natural sorbent based on bentonite clay, 1 kg of bentonite from the Nurata deposit was weighed, crushed, and dried in a drying unit at a constant weight for 1 hour at a temperature of 150°C with periodic stirring. After drying, the weight of the weighed bentonite was 0.85 kg, and the average moisture content of the samples was 15%. Based on the results of our experiments to determine the mineralogical composition of bentonite, it was established that the maximum content of bentonite is found in fractions with a diameter of less than 0.002 mm. Therefore, to separate the dried bentonite samples from organic additives, pebbles, and other impurities, they were passed through a sieve with a hole diameter of 0.002 mm. The granulometric and mineralogical composition of our classified sample was determined to be particles with a diameter of less than 0.002 mm, cleaned of fine sand and organic impurities, and containing at least 60% bentonite.

The determination of the granulometric composition of bulk materials consists of determining the material fractions of various dispersions and their sums [14]. Bentonite samples were divided into fractions in sieves consisting of cells of various diameters, and their fractions were calculated. The results of the analysis of the fractional composition of samples from the Nurata, Azkamar, and Navbakhor deposits are presented in

Table 2.

Table 2

Fractional composition of bentonite clay samples obtained and enriched from various deposits

Sieve cell diameter, mm	Bentonite residue in sieve					
	Bentonite of the Nurata deposit		Bentonite of the Azkamar deposit		Bentonite of the Navbakhor deposit	
	Residual mass, g	Amount of fraction, %	Residual mass, g	Amount of fraction, %	Residual mass, g	Amount of fraction, %
0,063	0,41	0,048	2,95	0,32	0,3	0,041
0,045	0,72	0,085	12,02	1,32	0,22	0,03
0,0315	3,25	0,38	33,30	3,67	1,51	0,20
0,025	30,04	3,53	94,12	10,38	6,81	0,93
0,02	142,28	16,74	193,42	21,32	133,84	18,32
0,002	484,07	56,85	437,13	48,19	399,51	54,68
0,001	132,36	15,57	94,02	10,37	110,02	15,06
0,008	25,27	2,97	19,42	2,14	32,14	4,40
0,005	21,48	2,53	16,43	1,81	37,32	5,11
<0,005	10,12	1,29	4,71	0,52	8,92	1,22

Conclusion. During the conducted research, chemical and mineralogical analyses of bentonite samples from the Nuratina, Azkamar, and Navbakhor deposits were conducted. It has been established that the main part of the bentonite clay is in fractions below 0.002 mm. A suitable deposit was selected to obtain an environmentally friendly adsorbent by processing bentonite clay. It has been established that the main part of the bentonite clay (90-95%) is contained in fractions up to 0.04-0.7 μm. As the optimal raw material, a sample of Nurata bentonite was selected, which contains a relatively high amount of aluminum oxide involved in the sorption process.

REFERENCES

- [1] Горная энциклопедия. (n.d.). Бентонит. <http://www.mining-enc.ru/b/bentonit/>
- [2] Сапаргалиев, Е. М. (2008). Таганское месторождение бентонитов в Зайсанской впадине. Геология и охрана недр, 4, 42–49.
- [3] Бельчинская, Л. И., Козлов, К. А., Бондаренко, А. В., Петухова, Г. А., & Губкина, М. Л. (2007). Изучение структурных и адсорбционных характеристик при активации и модификации природных силикатов. Сорбционные и хроматографические процессы, 7(4), 571–576.
- [4] Бойматов, И. М., Эшметов, И. Д., & Хошимов, Ш. М. (2020). Адсорбция паров бензола на модифицированных углеминеральных адсорбентах. Universum: Химия и биология, 7(73), 57–59.
- [5] G'aniyeva, N. M., Ochilov, G'. M., & Boymatov, I. M. (2023). Tabiiy xom ashyolar asosida faollab olingan adsorbentlarda turli moddalar adsorbtsiyasi. NamDU axborotnomasi, 3(1), 378–378.
- [6] Tarasevich, Y. I. (1988). Structure and surface chemistry of layered silicates. Naukova Dumka.
- [7] Shashkova, I. L., Ratko, A. I., Milvit, N. V., Dyachenko, A. G., & Vecherniy, V. A. (2000). Extraction of heavy metal ions from aqueous solutions using natural carbonate-containing Tripoli. Журнал прикладной химии, 73(6).

- [8] Shidlovskaya, I. P. (2006). Complex utilization of wastewater from copper smelting enterprises (Candidate dissertation). Ekaterinburg.
- [9] Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources. (2004). Development of a project for the rehabilitation of the Sak-Elga River, Ryzhego Brook and the Atkus River. FGUP RosNIIVKh.
- [10] Commission for the Study of Clays. (1961). Materials for the classification of clay minerals. IGEM AN SSSR.
- [11] Jiang, K., Sun, T., & Sun, L. (2006). Adsorption characteristics of copper, lead, zinc and cadmium ions by tourmaline. *Journal of Environmental Sciences*, 18(6), 1221–1225.
- [12] Strubel, G., & Zimmer, Z. (1987). Mineralogical dictionary. Nedra.
- [13] Naumov, S. V. (2012). Modern methods for determining the particle size distribution of powdery components of welding materials. *Bulletin of PSTU. Mechanical Engineering, Materials Science*, 14(1), 76–84.
- [14] Sabirov, B. T., Kadirova, Z. R., Pulatov, Kh. L., Tairov, S. S., & Ergashev, Sh. T. (2021). Research of the basic physical and chemical properties of bentonite clays of perspective deposits of Uzbekistan. In *Proceedings of the 8th Euro Asia International Congress on Applied Sciences* (pp. 318–322).
- [15] Мухторова, Н. Б., Сабилов, Б. Т., & Алиев, Б. А. (2022). Исследование химико-минералогического состава шафирканской бентонитовой глины для получения новых сорбентов. *Science and Innovation*, 3, 168–175.
- [16] Муфтуллаева, М. Б., Реймов, А. М., & Сабилов, Б. Т. (2023). Химический состав бентонита Каракалпакстана Муйнакского месторождения. *Universum: Технические науки*, 7(112). <https://doi.org/10.32743/UniTech.2023.112.7.15766>
- [17] Mukhtorova, N. B., Aliev, B. A., Sabirov, B. T., & Umirov, U. F. (2023). Thermodynamics of the desorption process and features of regeneration of adsorbents based on bentonite clay. *Science and Innovation*, 2(9), 81–87. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8367636>
- [18] Mukhtorova, N. B., Aliev, B. A., Sabirov, B. T., & Umirov, U. F. (2023). Researching of the processes of purification of wastewater in textile production with bentonite adsorbents. *Science and Innovation*, 2(9), 123–129. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8386901>
- [19] Умиров, У. Ф., Сабилов, Б. Т., Умиров, Ф. Э., & Темиров, У. Ш. (2023). Окова сувларни тозалаш учун сорбентлар олиш ва уларнинг хоссаларини ўрганиш. *Фан ва технологиялар тараққиёти*, 5, 65–71.
- [20] Мухторова, Н. Б., Шарипова, У. И., Шохакимова, А. А., Умиров, У. Ф., Пулатов, Х. Л., Сабилов, Б. Т., & Миралимова, А. И. (2023). Исследование процесса сорбции ионов комплексных соединений хрома, цинка, никеля и кобальта, содержащихся в составе сточных вод бентонитовой глиной. *Journal of Modern Educational Achievements*, 12, 228–238.
- [21] Mukhtorova, N., Aliev, B., Sabirov, B., Umirov, U., Shokhakimova, A., & Ergashev, Y. (2024). Process investigation of ion sorption of complex compounds made by chromium, zinc, nickel and cobalt contained in wastewater bentonite clay. *E3S Web of Conferences*, 497, Article 03046. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449703046>
- [22] Сабилов, Б. Т. (2025). Современное состояние добычи и переработки бентонитовых глин Узбекистана. *Литейщик России*, 1.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Husenov, A. U., Xadjibayev, D. A., & Sabirov, B. T. (2026). Selection and evaluation of promising bentonite deposits for the production of sorption materials used in industrial wastewater treatment. *Digital Technologies in Industry*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.8>

UO'K: 553.674:54-386

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.9

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

NAVBAHOR KONI BENTONIT GILINING XLORID KISLOTA YORDAMIDA MODIFIKATSIYALANISHI VA UNING FIZIK-KIMYOVIY XOSSALARINI TADQIQ ETISH



**Husenov Abdurasul
O'ktamovich**

Jizzax politexnika institutining
mustaqil tadqiqotchisi, Jizzax,
O'zbekiston
E-mail:
abdurasulhusenov4@mail.ru
ORCID ID: 0009-0004-4255-6266



**Xadjibayev Diyor
Asadullayevich**

Texnika fanlari bo'yicha falsafa
doktori (PhD), Jizzax politexnika
institutini, Jizzax, O'zbekiston
E-mail:
diyorxadjibayev@gmail.com
ORCID ID: 0009-0007-1273-6153



**Sabirov Baxtiyor
To'xtayevich**

Texnika fanlari doktori, professor,
Jizzax politexnika instituti, Jizzax,
O'zbekiston
E-mail: bentosb@rambler.ru
ORCID ID: 0009-0007-1273-6153

Annotatsiya. Maqolada Navbahor koni bentonit gilini xlorid kislota yordamida kislotali modifikatsiyalash jarayoni hamda uning fizik-kimyoviy xossalariga ta'siri tadqiq etilgan. Bentonit namunalari 0,1 M va 1,5 M HCl eritmalari bilan faollashtirilib, ularning kimyoviy tarkibi hamda sirt morfologiyasidagi o'zgarishlar skanerlovchi elektron mikroskop (SEM) yordamida baholangan. Tadqiqot natijalari kislotali ishlov berish natijasida almashinuvchi kalsiy, natriy va magniy ionlari miqdori sezilarli darajada kamayishini, montmorillonitning asosiy kristall tuzilishi esa saqlanib qolishini ko'rsatdi. Shuningdek, bentonit yuzasida yangi g'ovaklar hosil bo'lishi va sorbsion faollikning ortishi aniqlandi. Olingan natijalar modifikatsiyalangan bentonitlarni adsorbent va sorbent material sifatida qo'llash istiqbollari yuqori ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: bentonit gili, Navbahor koni, xlorid kislota, kislotali faollashtirish, modifikatsiyalash, montmorillonit, sorbsiya, SEM, fizik-kimyoviy xossalar, adsorbent.

Received: 20.07.2026

Accepted: 06.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ БЕНТОНитОВОЙ ГЛИНЫ НАВБАХОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОЛЯНОЙ КИСЛОТОЙ И ЕЁ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

**Хусенов Абдуракул
Уктамович**

Независимый исследователь
Джизакского политехнического
института, Джизак,
Узбекистан

**Хаджибаев Диёр
Асадуллаевич**

Доктор философии по
техническим наукам (PhD),
Джизакский политехнический
институт, Джизак, Узбекистан

**Сабиров Бахтиёр
Тохтаевич**

Доктор технических наук,
профессор,
Джизакский политехнический
институт, Джизак, Узбекистан

Аннотация. В статье исследован процесс кислотной модификации бентонитовой глины Навбахорского месторождения растворами соляной кислоты и её влияние на физико-химические свойства материала. Образцы бентонита активировали растворами HCl концентрацией 0,1 М и 1,5 М, после чего исследовали изменения химического состава и морфологии поверхности методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Установлено, что кислотная обработка приводит к существенному снижению содержания обменных ионов кальция, натрия и магния при сохранении основной кристаллической структуры монтмориллонита. Кроме того, на поверхности сорбента формируются новые поры, что способствует повышению его сорбционной активности. Полученные результаты подтверждают перспективность использования модифицированных бентонитов в качестве эффективных адсорбционных материалов.

Ключевые слова: бентонитовая глина, Навбахорское месторождение, соляная кислота, кислотная активация, модификация, монтмориллонит, сорбция, СЭМ, физико-химические свойства, адсорбент.

INVESTIGATION OF HYDROCHLORIC ACID MODIFICATION OF NAVBAHOR BENTONITE CLAY AND ITS PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES

**Husenov Abdurasul
Uktamovich**

Independent Researcher, Jizzakh
Polytechnic Institute, Jizzakh,
Uzbekistan

**Xadjibayev Diyor
Asadullayevich**

Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Jizzakh
Polytechnic Institute, Jizzakh,
Uzbekistan

**Sabirov Baxtiyor
Toxtayevich**

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Jizzakh Polytechnic
Institute, Jizzakh, Uzbekistan

Abstract. This study investigates the acid modification of bentonite clay from the Navbahor deposit using hydrochloric acid and evaluates its effect on the physicochemical properties of the material. Bentonite samples were activated with 0.1 M and 1.5 M HCl solutions, and changes in their chemical composition and surface morphology were examined using scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that acid treatment significantly reduces the content of exchangeable calcium, sodium, and magnesium ions while preserving the primary crystal structure of montmorillonite. In addition, the formation of new pores on the bentonite surface enhances its sorption performance. The obtained findings demonstrate the potential of acid-modified bentonite as an effective adsorbent material for environmental and industrial applications.

Keywords: bentonite clay, Navbahor deposit, hydrochloric acid, acid activation, modification, montmorillonite, sorption, SEM, physicochemical properties, adsorbent.

Kirish. Bentonit gillari - dispersligi yuqori bo'lgan, asosan mayda zarrachalardan (0,01 mm dan kichik) tashkil topgan tabiiy materiallardir. Ular murakkab mineral va kimyoviy tarkibga, tartibsiz strukturaviy xususiyatlarga hamda turli xususiyatlarga, jumladan kation almashinuv qobiliyati va adsorbsiya (ham kimyoviy, ham fizik) xususiyatlariga ega [1-7]. Gillarning tarkibi juda xilma-xil bo'lib, turli xususiyatlarga ega bo'lgan minerallarning keng doirasini o'z ichiga oladi: tuzlar, (noorganik) moddalar, gilli minerallar, eritmadagi kationlar va boshqalar [8-9]. Shu tufayli

gillar eng ko'p funksiyali va xilma-xil minerallardan biridir. Gilli minerallarning hosil bo'lishi uzluksiz davom etadi va kolloid jarayonlar ushbu guruh minerallarining shakllanishi hamda o'zgarishida asosiy rol o'ynaydi [10, 11].

Ko'plab tadqiqotlar natijasida loy tarkibida qatlamli tuzilishga ega bo'lgan kristall materiallar aniqlandi. Ular xloritlar, slyudalar va boshqa minerallar bilan bir qatorda kremniy-kislorodli tetraedrlar va alyuminiy-kislorodli oktaedrlardan tashkil topgan qatlamli silikatlarining keng guruhiga kiradi. Bu strukturalar ichida Al^{3+} , Fe^{3+} va Mg^{2+}

kationlari, cho'qqilarida esa O^{2-} va OH^- anionlari joylashadi [12-14].

Bentonit gillari og'ir metall ionlari [15], organik bo'yoqlar [16] kabi turli moddalar uchun yaxshi va arzon sorbentlar hisoblanadi. Gillar tarkibida montmorillonit, paligorskit, illit kabi qatlamli silikatlar (fillosilikatlar, smektitlar) mavjudligi tufayli sorbsiya sodir bo'ladi.

Bentonit gillarining asosiy tarkibiy qismini tashkil qiluvchi minerali montmorillonit bo'lib, uning tuzilishi kremniy-kislorodli tetraedrlar qatlamlarini o'z ichiga oladi, ular orasida esa alyuminiy-kislorodli oktaedrlar joylashgan. Al^{3+} ionlarining Mg^{2+} ionlari bilan, shuningdek, Fe^{2+} / Fe^{3+} ionlari va kamroq Si^{4+} ionlarining Al^{3+} ionlari bilan qisman izomorf almashinishi strukturaviy manfiy zaryadning paydo bo'lishiga olib keladi, bu esa qatlamlararo (almashinuvchi) kationlar bilan kompensatsiyalanadi. Odatda, almashinuvchi kationlar Ca^{2+} va Na^+ bo'ladi. Montmorillonit eng ko'p o'rganilgan mineraldir [17]. Montmorillonit tuzilishining o'ziga xos xususiyati kengayib boruvchi kristall panjarasi bo'lib, u tufayli mineral yirik organik molekulalar bilan modifikatsiyalanishi mumkin [18], natijada bentonit gillarining amaliy qo'llanish sohasi keskin kengayadi.

Bentonit gilini kislotali faollashtirish organik va noorganik moddalar uchun g'ovakli sorbentlar [19, 20], kislotali katalizatorlar [18, 21] olishning keng tarqalgan usuli hisoblanadi. Bundan tashqari, qatlamli tuzilishni saqlab qolgan holda kislotali faollashtirish fillosilikatlarni kimyoviy modifikatsiyalashning dastlabki bosqichi sifatida zarurdir [22].

Kislotali faollashtirishning asosiy parametrlari, masalan, kislotalarning tabiati va konsentratsiyasi, faollashtirish harorati va vaqti, gil/kislota eritmasi nisbati maqsadli mahsulotning keyingi qo'llanilishiga qarab o'zgaradi. Ma'lumki, kislotali faollashuvning boshlang'ich bosqichida almashinuvchi kationlar vodorod ionlariga almashinadi va N-bentonit hosil bo'ladi. Keyinchalik, kislotalarning konsentratsiyasiga qarab, quyidagi ketma-ketlikda strukturaviy kationlarning yuvilishi sodir bo'ladi: $Mg^{2+} > Fe^{2+} > Fe^{3+} > Al^{3+}$ [23]. Shunday qilib, tarkibida magniy ionlari ko'p bo'lgan gil minerallari kislotalar ta'sirida tezroq parchalanadi.

Shuni ta'kidlash kerakki, faollashtirish

iqtisodiy jihatdan samarali bo'lishi kerak. Iloji boricha, kislotalarning suyultirilgan eritmaları, nisbatan yuqori bo'lmagan harorat va faollashtirish vaqti afzal ko'riladi. Shuni ham hisobga olish kerakki, loyni ortiqcha kislotalardan yuvish ancha ko'p mehnat talab qiladigan jarayon hisoblanadi, shuning uchun ko'p hollarda tabiiy loyni kimyoviy tarkibi xususiyatlarini, aralashmalar mavjudligini hisobga olgan holda kislotalarning optimal konsentratsiyasini oldindan hisoblab chiqish maqsadga muvofiqdir. Turli kislotalar bilan faollashtirilgan turli konlar gillarining fizik-kimyoviy parametrlarini o'rganishga yetarlicha ishlar bag'ishlangan [22-25].

Turli haroratlarda (80 dan 100 °C gacha) 0,5 M dan 6 M gacha konsentratsiya oralig'ida fosfat, sulfat, xlorid kislota eritmaları ta'siri natijasida gilli minerallarning kimyoviy tarkibi va tuzilishining o'zgarish xususiyatlari o'rganildi. Masalan, [25]-ishda rentgenfazaviy tahlil va infraqizil spektroskopiya yordamida 80 °C haroratda 0,5-12 soat davomida 2 M xlorid kislotali bilan kislotali faollashtirilgan Tulant (Mo'g'uliston) konining bentonit gili namunalari o'rganildi. Kislotali faollashtirishning 2 soati davomida Ca^{2+} ionlarining 82,2% ga yo'qotilishi, shu bilan birga Mg^{2+} ionlarining 30,6% ga va Fe^{3+} ionlarining 30,1% ga kamayishi aniqlandi. Ish mualliflarining xulosasiga ko'ra, faollashuvning dastlabki bosqichlaridayoq almashinuvchi ionlarning sezilarli miqdori yo'qotiladi, shuningdek, smektitning kristall panjarasidan strukturaviy kationlarning ajralib chiqishi boshlanadi. Mualliflarning ta'kidlashicha, dala shpati, kalsit kabi aralashmalarining mavjudligi gil namunalaridan Ca^{2+} va K^+ ionlarini to'liq yo'qotishni qiyinlashtiradi.

Shuni ta'kidlash kerakki, kislotalarni tanlash tabiiy gilning kimyoviy tarkibiga va faollashtirilgan namunalarning keyingi qo'llanilishiga bog'liq. Nitrat va sulfat kislotalar gil namunalaridagi alyumosilikatlar strukturasi samarali ta'sir qiladi va sorbsion minerallarning kristall panjaralarida defektlar hosil qilib, faolligini oshiradi. Bundan tashqari kislotali faollantirilganda mineral strukturasi anchagina o'zgarishlar kuzatiladi. Shu sababli gilni kislotali faollashtirish uchun ko'p hollarda HCl ishlatiladi.

Turli konlarning bentonit gillariga kislota bilan ishlov berish parametrlari muhim ahamiyatga ega, shuning uchun turli xil konlardan olingan

bentonit gilini kislota yordamida ishlov berishni o'rganish muhim ahamiyat kasb etadi. Ushbu ishda Navoiy viloyati Navbahor koni bentonit gilining kimyoviy tarkibi va tuzilishiga suyuq xlorid kislota eritmalarining ta'siri o'rganildi.

Metodologiya. Laboratoriya tadqiqotlari va tajribalarni o'tkazishda zamonaviy fizik-kimyoviy tahlilning vizual va analitik usullari hamda "JEOL JSM 7001 F" skanerlovchi elektron mikroskopda o'tkazildi.

Tadqiqot obyektlari. Laboratoriya tajribalarini o'tkazish uchun boshlang'ich xomashyo sifatida Navoiy viloyatidagi Navbahor konining bentonit gili namunasi tanlab olindi hamda boyitilgan va xlorid kislota bilan modifikatsiyalangan bentonit gili namunalari o'rganildi.

Natijalar va ularning muhokamasi. Dastlab laboratoriya sharoitida bentonit gilining boyitilgan fraksiyasidan foydalanildi, u quyidagicha olindi: 50 g tabiiy gil 500 ml distillangan suvda yaxshilab aralashtirilgan holda suspenziya tayyorlandi; bunda gil tarkibiga kiruvchi barcha minerallarning zarrachalari fraksiyalarga bo'lindi. Olingan suspenziya bir sutka davomida qoldirildi. So'ngra gilning boyitilgan fraksiyasi 10 daqiqa davomida 5000 ayl/min tezlikda sentrifugalash orqali ajratib olindi. Olingan fraksiya 12 soat davomida ochiq havoda, so'ngra 70 °C haroratda 12 soat davomida quritildi.

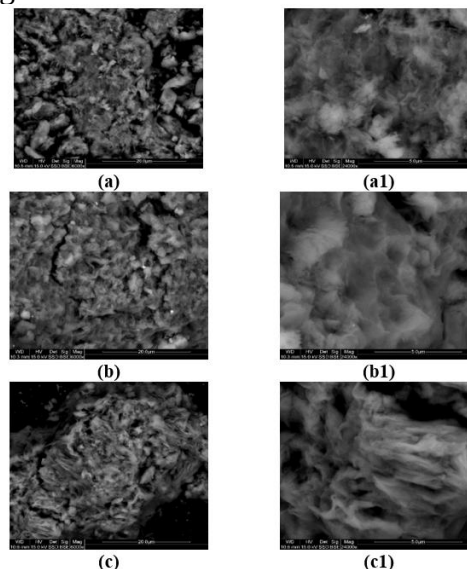
1-jadval

Navbahor koni bentonit gili namunalarining kimyoviy tarkibi

Kimyoviy tarkibi	Navbahor koni bentoniti	Boyitilgan Navbahor koni bentoniti	0,1 M li HCl kislota bilan modifikatsiyalangan	1,5 M li HCl kislota bilan modifikatsiyalangan
SiO ₂	56,95	53,33	53,83	54,83
TiO ₂	0,48	0,40	0,43	0,20
Al ₂ O ₃	14,59	15,46	16,46	15,46
Fe ₂ O ₃	9,03	9,1	10,5	8,5
MgO	2,24	2,96	1,39	1,15
CaO	2,4	2,3	0,87	0,23
Na ₂ O	1,2	0,9	0,43	0,1
K ₂ O	1,54	1,14	1,14	1,09
SO ₃	0,10	0,07	0,07	0,1

Faollashtirish 0,1 M va 1,5 M konsentratsiyali xlorid kislota bilan 80 °C haroratda 2 soat davomida amalga oshirildi. Faollashtirilgandan so'ng gil suspenziyasi darhol 500 ml distillangan suvga quyib sovutildi. So'ngra bentonit gili bir necha marta distillangan suv bilan yuvildi hamda L-450 markali sentrafuga yordamida fraksiyalarga ajratildi. 12 soat

davomida xona haroratida, so'ngra 12 soat davomida 70 °C haroratda quritildi, hovonchada maydalandi va maxsus idishlarda saqlandi. Bentonit gili namunalarining kimyoviy tarkibi 1-jadvalda keltirilgan.



1-rasm. Navbahor koni bentonitining xlorid kislota bilan modifikatsiyalashdan oldingi va keyingi SEM tasvirlari:

a, a1 - dastlabki bentonit gili namunasi; b, b1 - 0,1 M li kislota bilan ishlov berilgan; c, c1 - 1,5 M li kislota bilan ishlov berilgan.

Jadval ma'lumotlaridan xulosa qilish mumkinki, 0,1 M konsentratsiyali xlorid kislota (HCl) bilan ishlov berish natijasida kalsiy va natriy kationlari miqdori kamayadi, bunda Ca/Na nisbati 2:1 ko'rinishida barqaror saqlanib qoladi. Kalsiy va natriy ionlari konsentratsiyasi mos ravishda 63,8% va 64,3% ga kamayadi. Shu bilan birga, magniy ionlari miqdori 35,2% ga qisqaradi, bu esa, ehtimol, strukturaviy kationlarning dastlab yuvilib chiqishi boshlanganini ko'rsatadi. Kaliy ionlari miqdori esa o'zgarmaydi, bundan ushbu kation kislotalar ta'siriga nisbatan barqaror bo'lgan dala shpati tarkibiga kirishi mumkin, degan xulosaga kelish mumkin. 1,5 M konsentratsiyali xlorid kislota bilan ishlov berilgandan so'ng kalsiy ionlari miqdori deyarli eng minimal darajagacha kamayadi. Kalsiy va natriy ionlari miqdori mos ravishda 90,5% va 91,5% ga kamayadi, magniy ionlari miqdori esa 48,5% ga qisqaradi. Alyuminiy va kremniy kationlari miqdori o'zgarmasdan qoladi. Demak, umumiy holda gil minerallarining kristall tuzilishi saqlanib qoladi.

Bentonit sirtining morfologiyasini o'rganish uchun (1-rasm) SEM tasvirlari olindi.

1-rasmda a, a1 tabiiy bentonitning morfologiyasi keltirilgan. Unda smektitga xos bo'lgan to'qimasimon (qatlamsimon) tuzilish kuzatiladi, biroq qatlamlarning ajralish zonolari aniq ifodalanmagan. b, b1-rasmda 0,1 M li HCl bilan modifikatsiyalangan bentonit morfologiyasida yaqqol o'zgarishlarni yuzaga keltirgan. c, c1-rasmda 1,5 M li HCl bilan modifikatsiyalangan bentonitning morfologiyasi ko'rsatilgan. To'qimasimon tuzilish saqlanib qolgan bo'lsada, ayrim morfologik o'zgarishlar kuzatiladi. Qatlamsimon tuzilish tabiiy bentonitga nisbatan ancha tartibli yo'nalishga ega bo'ladi.

Tabiiy va ishlov berilgan bentonitning morfologiyasi skanerlovchi elektron mikroskop yordamida o'rganilganda, namunalarda montmorillonit strukturasiidagi yumaloq kvars donachalari, slyuda bo'laklari hamda mikroorganizmlarning

kremniyli skelet qoldiqlari aniqlandi.

Xulosa. Navbahor konidan olingan bentonit gilining tarkibidagi montmorillonit kalsiyli montmorillonit shaklida mavjud.

Bentonit gilini 0,1 M xlorid kislota eritmasi bilan kislotali faollashtirish kalsiy va natriy ionlarini mos ravishda 63,8 va 64,3% ga, magniy ionlarini esa 35,2% ga yuvilishiga olib keladi.

Bentonit gilini 1,5 M xlorid kislota eritmasi bilan faollashtirish kalsiy ionlari konsentrat-siyasining 90,5% ga, natriy ionlari konsentrat-siyasining 91,3% ga kamayishiga olib keladi, magniy ionlari konsentrat-siyasining 48,5% ga yo'qolishi sodir bo'ladi.

Shunday qilib, o'rganilayotgan bentonit gilining qatlamlararo bo'shlig'idan almashinuvchi Ca^{2+} va Na^{+} kationlarini deyarli to'liq yo'qotish uchun 1,5 M xlorid kislota bilan 2 soat davomida 80°C haroratda faollashtirish tavsiya etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Алванян, К. А., Андрианов, А. В., & Селезнева, Ю. Н. (2020). Закономерности изменения гранулометрического состава бентонитовой глины Зырянского месторождения, активированной давлением. Вестник Пермского университета, 19(4), 380–387.
- [2] Анюхина, А. В., & Федоров, М. В. (2017). Изменение содержания воды в глинах при высоких давлениях. В Современные технологии в строительстве. Теория и практика (с. 100–101).
- [3] Везенцев, А. И., Трубицын, М. А., & Кормош, Е. В. (2012). Монтмориллонитовые глины как потенциальный сорбент патогенных веществ и микроорганизмов. Сорбционные и хроматографические процессы, 12(6), 998–1004.
- [4] Манучаров, А. С., Черноморченко, Н. И., Карпачевский, Л. О., & Зубкова, Т. А. (2004). Влияние обменных катионов на гидросорбционные свойства минералов. Почвоведение, (9), 1126–1133.
- [5] Бельчинская, Л. И., Бондаренко, А. В., Губкина, М. Л., и др. (2006). Влияние термического модифицирования на адсорбционные свойства природных силикатов. Сорбционные и хроматографические процессы, 6(1), 80–88.
- [6] Анюхина, А. В., Середин, В. В., Андрианов, А. В., & Хлуденева, Т. Ю. (2021). Влияние термической обработки глин на их адсорбцию по красителю метиленовый голубой. Недропользование, 21(2), 52–57.
- [7] Гальперина, М. К., & Павлов, В. Ф. (1971). Глины для производства керамических изделий. ВНИИЭСМ.
- [8] Кормош, Е. В., Алябьева, Т. М., & Погорелова, А. Г. (2011). Химико-минералогические аспекты возможности использования глин Белгородской области в разработке сорбентов для очистки сточных вод. Фундаментальные исследования, (8), 131–136.
- [9] Осипов, В. И., & Соколов, В. Н. (2013). Глины и их свойства. ГЕОС.
- [10] Семериков, И. С., & Герасимова, Е. С. (2015). Физическая химия строительных материалов. Издательство Уральского университета.

- [11] Трофимов, В. Т., Королев, В. А., Вознесенский, В. А., и др. (2005). Грунтоведение (6-е изд.). Издательство Московского государственного университета.
- [12] Дудина, С. Н. (2010). Сорбция из растворов ионов Fe^{3+} и Ni^{2+} природными и активированными глинами. Научные ведомости. Серия: Естественные науки, (9), 131–136.
- [13] Тарасевич, Ю. И., & Овчаренко, Ф. Д. (1975). Адсорбция на глинистых минералах. Наукова думка.
- [14] Naseem, R., & Tahir, S. S. (2001). Removal of Pb(II) from aqueous/acidic solutions by using bentonite as adsorbent. *Water Research*, 35(16), 3982–3986.
- [15] Eren, E., & Afsin, B. (2009). Removal of basic dyes using raw and acid-activated bentonite samples. *Journal of Hazardous Materials*, 166(2–3), 830–835.
- [16] Meunier, A. (2005). *Clays*. Springer.
- [17] Breen, C., & Watson, R. (1998). Acid-activated organoclays: Preparation, characterization and catalytic activity of polycation-treated bentonites. *Applied Clay Science*, 12(6), 479–494.
- [18] Christidis, G. E., Scott, P. W., & Dunham, A. C. (1997). Acid activation and bleaching capacity of bentonites from the islands Milos and Chios, Aegean, Greece. *Applied Clay Science*, 12(4), 329–347.
- [19] Eloussaief, M., & Benzina, M. (2010). Efficiency of natural and acid-activated clays in the removal of Pb(II) from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1–3), 753–757.
- [20] Hart, M. P., & Brown, D. R. (2004). Surface acidities and catalytic activities of acid-activated clays. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 212(1–2), 315–321.
- [21] Suarya, R., Bawa Putra, A. A., & Wisudawan, D. (2010). Interkalasi tetraetil ortosilikat (TEOS) para lempung teraktifasi asam sulfat dan pemanfaatannya sebagai adsorben warna limbah garmen. *Jurnal Kimia*, 4(1), 43–48.
- [22] Novaković, T., Rozić, L., Petrović, S., et al. (2008). Synthesis and characterization of acid-activated Serbian smectite clays obtained by statistically designed experiments. *Chemical Engineering Journal*, 137(2), 436–442.
- [23] Бельчинская, Л. И., Козлов, К. А., Читечан, С. С., и др. (2008). Адсорбционные характеристики нанопористого монтмориллонита, активированного фосфорной кислотой. *Физикохимия поверхности и защита металлов*, 44(3), 295–299.
- [24] Salem, A., & Karimi, L. (2009). Physicochemical variation in bentonite by sulfuric acid activation. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 26(4), 980–984.
- [25] Temuujin, J., Jadambaa, Ts., Burmaa, J., et al. (2004). Characterization of acid activated montmorillonite clay from Tuulant (Mongolia). *Ceramics International*, 30(2), 251–255.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Husenov, A. O., Xadjibayev, D. A., & Sabirov, B. T. (2026). Navbahor koni bentonit gilining xlorid kislotasi yordamida modifikatsiyalanishi va uning fizik-kimyoviy xossalari tadqiq etish. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.9>

UO‘K: 67.08:347.218.1

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.38

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

SOF, CHIQINDI, QAYTA ISHLANGAN VA PLASTIFIKATSIYALGAN POLIURETAN NAMUNALARINING QIYOSIY TERMOGRAVIMETRIK TAHLILI



**Shodiev Asliddin
Faxriddin o'g'li**

T.f.f.d. (PhD), Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Agromuhandislik va
kommunikatsion texnologiyalar
fakulteti dekan o'rinbosari, Navoiy,
O'zbekiston
E-mail:
shodiyevasliddin22@gmail.com
ORCID ID: 0009-0006-7776-1950
Science ID: FNV-0525-0014



**Muhiddinov Bahodir
Fahriddinovich**

K.f.d., professor, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Kimyoviy texnologiya
kafedrası, Navoiy, O'zbekiston
E-mail: muhiddinov.b@mail.ru
ORCID ID: 0009-0006-2411-2914
Science ID: DBX-0525-0007



**Jo'rayev Shoxruh
To'liqinovich**

T.f.d., professor, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Agromuhandislik va
kommunikatsion texnologiyalar
fakulteti dekani, Navoiy,
O'zbekiston
E-mail: shoxa299090@gmail.com
ORCID ID: 0009-0002-0839-5994
Science ID: FBX-0325-0004



**Shokirov Ravshan
Qahramonovich**

Tayanch doktorant, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Agronomiya kafedrası,
Navoiy, O'zbekiston
E-mail:
shokirovravshan178@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-8218-7599
Science ID: MBX-1125-0014

Annotatsiya. Ushbu maqolada sof, chiqindi, qayta ishlangan hamda plastifikatsiyalangan poliuretan namunalari termogravimetrik tahlil va differensial skanerlovchi kalorimetriya usullari yordamida tadqiq etilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi poliuretan chiqindilarini qayta ishlash va plastifikatsiyalash jarayonlarining polimerning termik barqarorligi hamda molekulyar tuzilishiga ta'sirini aniqlash va uning xossalarini sof poliuretan namunasiga nisbatan saqlab qolish imkoniyatini baholashdan iborat. Termogravimetrik tahlil natijalari barcha namunalarda termik destruksiyaning ikki yoki uch bosqichda sodir bo'lishini ko'rsatdi. Bunda ($-NH-CO-O-$), karbonil ($-COO-$) va efir ($-C-O-C-$) bog'larining uzilishi, polimer asosiy zanjirining parchalanishi, CO_2 , CO , NH_3 , suv bug'i va boshqa uchuvchan organik mahsulotlarning hosil bo'lishi hamda karbonlangan qoldiqlarning termik oksidlanishi kuzatildi. Shuningdek, toza, chiqindi, 4,4-metilendifenildiizotsianat oligomeri asosida qayta ishlangan hamda etilenglikol va glitserin yordamida plastifikatsiyalangan poliuretan namunalarning harorat ta'sirida massa yo'qotilishi, parchalanish tezligi, parchalanish haroratining boshlanishi va tugashi kabi termik xususiyatlari o'rganildi. Barcha namunalar uchun umumiy massa va tadqiqot sharoitlarining bir xilligi ta'minlangan. Olingan natijalar poliuretan chiqindilarini qayta ishlash orqali fizik-mexanik xossalari yaxshilangan polimer materiallarini olish imkoniyatini ilmiy jihatdan asoslaydi.

Kalit so'zlar: 4,4-metilendifenildiizotsianat, poliefir, poliuretan, poliuretan chiqindilari, termogravimetrik tahlil, differensial skanerlovchi kalorimetriya, termik destruksiya, uretan bog'lari, plastifikatsiya, glitserin, etilenglikol, qayta ishlash, termik barqarorlik, kompozitsion materiallar, massa yo'qotilishi, parchalanish tezligi.

Received: 19.08.2026

Accepted: 19.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ ЧИСТОГО, ОТРАБОТАННОГО, ПЕРЕРАБОТАННОГО И ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИУРЕТАНА

**Шодиев Аслиддин
Фахриддин угли**

PhD по техническим наукам,
заместитель декана факультета
агроинженерии и
коммуникационных технологий
Навоийского государственного
горно-технологического
университета, Навои,
Узбекистан

**Мухиддинов Баходир
Фахриддинович**

Кандидат химических наук,
профессор кафедры химической
технологии Навоийского
государственного горно-
технологического университета,
Навои, Узбекистан

**Жураев Шохрух
Тулкинович**

Доктор технических наук,
профессор, декан факультета
агроинженерии и
коммуникационных технологий
Навоийского государственного
горно-технологического
университета, Навои,
Узбекистан

**Шокиров Равшан
Кахрамонович**

Базовый докторант кафедры
агрономии Навоийского
государственного горно-
технологического университета,
Навои, Узбекистан

Аннотация. В статье исследованы образцы чистого, отходного, переработанного и пластифицированного полиуретана с использованием методов термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии. Основной целью исследования являлось определение влияния процессов переработки и пластификации отходов полиуретана на термическую стабильность и молекулярную структуру полимера, а также оценка возможности сохранения его свойств по сравнению с исходным образцом полиуретана. Результаты термогравиметрического анализа показали, что термическая деструкция всех исследованных образцов протекает в две или три стадии. При этом наблюдаются разрыв связей ($-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$), карбонильных ($-\text{COO}-$) и эфирных ($-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$) связей, разрушение основной полимерной цепи, образование CO_2 , CO , NH_3 , водяного пара и других летучих органических продуктов, а также термическое окисление карбонизированных остатков. Исследованы такие термические характеристики образцов чистого, отходного, переработанного на основе олигомера 4,4-метиленидифенилдиизоцианата и пластифицированного с использованием этиленгликоля и глицерина полиуретана, как потеря массы под воздействием температуры, скорость разложения, начальная и конечная температуры разложения. Для всех образцов обеспечивались одинаковые общая масса и условия проведения исследований. Полученные результаты научно обосновывают возможность получения полимерных материалов с улучшенными физико-механическими свойствами посредством переработки отходов полиуретана.

Ключевые слова: 4,4-метиленидифенилдиизоцианат, полиэфир, полиуретан, отходы полиуретана, термогравиметрический анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, термическая деструкция, уретановые связи, пластификация, глицерин, этиленгликоль, переработка, термическая стабильность, композиционные материалы, потеря массы, скорость разложения.

COMPARATIVE THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS OF VIRGIN, WASTE, RECYCLED, AND PLASTICIZED POLYURETHANE SAMPLES

**Shodiev Asliddin
Fakhriddin ugli**

PhD in Technical Sciences, Deputy
Dean of the Faculty of
Agroengineering and
Communication Technologies,
Navoi State University of Mining
and Technologies, Navoi,
Uzbekistan

**Muhiddinov Bahodir
Fakhriddinovich**

Candidate of Chemical Sciences,
Professor, Department of Chemical
Technology, Navoi State University
of Mining and Technologies, Navoi,
Uzbekistan

**Jurayev Shokhrux
Tulkinovich**

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Dean of the Faculty of
Agroengineering and
Communication Technologies,
Navoi State University of Mining
and Technologies, Navoi,
Uzbekistan

**Shokirov Ravshan
Kahramonovich**

Basic Doctoral Student,
Department of Agronomy, Navoi
State University of Mining and
Technologies, Navoi, Uzbekistan

Abstract. This article presents a study of pure, waste, recycled, and plasticized polyurethane samples using thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry. The main objective of the study was to determine the effect of polyurethane waste recycling and plasticization processes on the thermal stability and molecular structure of the polymer and to evaluate the possibility of retaining its properties compared with the pure polyurethane sample. The thermogravimetric results showed that thermal degradation of all investigated samples occurs in two or three stages. The process involves the cleavage of ($-NH-CO-O-$), carbonyl ($-COO-$), and ether ($-C-O-C-$) bonds, degradation of the main polymer chain, formation of CO_2 , CO , NH_3 , water vapor, and other volatile organic products, as well as thermal oxidation of carbonized residues. The thermal characteristics of pure, waste, recycled polyurethane based on a 4,4-methylenediphenyl diisocyanate oligomer, and polyurethane plasticized using ethylene glycol and glycerin were investigated, including mass loss under temperature exposure, degradation rate, and the initial and final degradation temperatures. The total sample mass and experimental conditions were kept identical for all five samples. The obtained results scientifically substantiate the possibility of producing polymer materials with improved physical and mechanical properties through the recycling of polyurethane waste.

Keywords: 4,4-methylenediphenyl diisocyanate, polyester, polyurethane, polyurethane waste, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry, thermal degradation, urethane bonds, plasticization, glycerin, ethylene glycol, recycling, thermal stability, composite materials, mass loss, degradation rate.

Kirish. Hozirgi vaqtda sanoat korxonalarini rivojlantirishda polimerlar texnologiyasi, xususan, poliuretanlar optimal fizik-mexanik xususiyatlari, jumladan, yuqori mustahkamligi, adgeziyalanishi, yeyrilishga bardoshliligi va kimyoviy reagentlar ta'siriga chidamliligi bilan alohida o'rin tutadi. Bugungi kunda ushbu materiallar samolyotsozlik, qurilish, mashinasozlik va tibbiyot kabi strategik sohalarida keng qo'llanilmoqda. Biroq poliuretan qoplamali sanoat detallarini ishlab chiqarish va ulardan foydalanish hajmining ortishi bilan birga, poliuretan chiqindilari ham hosil bo'lmoqda. Ushbu chiqindilarni qayta ishlash va ikkilamchi xomashyodan yuqori sifatli mahsulotlar olish masalasi ekologik va iqtisodiy jihatdan dolzarb muammoga aylandi.

Poliuretanlarning xossalari ularning molekulyar tuzilishida mavjud segmentlar nisbatiga bog'liq. Poliuretan hosil qiluvchi zanjir uzunligi, kristallik darajasi, molekulyar massasi, zanjirdagi to'ring mavjudligi, zichligi va tabiati kabi xilma-xil xususiyatlaridan foydalanish ularni keng qo'llash imkonini beradi [1]. Ushbu polimerlarning termik xossalarini o'rganish ularni qo'llash sohalarini yanada kengaytiradi. Ular lak-bo'yoq qoplamalari, yelimlar (kley), germetiklar, izolyatorlar, prokladkalar, poyabzal tag qismlari va boshqa sohalarida ishlatiladi.

Jahon bozori tahliliga ko'ra, poliuretan

iste'moli yaqin kelajakda har yili 6,8 foizga o'sishi kutilmoqda. Natijada bozor hajmi 7,8 milliard dollarga yetishi bashorat qilingan. Ushbu summaning 2,7 milliard dollari poliuretan asosidagi yopishqoq moddalar va germetiklarga, qolgan qismi esa suyuq hamda ko'pikli poliuretan bozoriga to'g'ri keladi.

Tadqiqotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, haroratning o'zgarishi poliuretanning parchalanish temperaturasi, massa yo'qotilishi, parchalanish tezligi va qattiq qoldiq miqdori kabi xususiyatlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi [5]. Toza, chiqindi, qayta ishlangan va plastifikatsiyalangan poliuretan materiallarining termik xossalari ularning molekulyar tuzilishi hamda zanjirlararo bog'lanish darajasiga bog'liqligini ko'rsatdi [2].

Turli holatdagi toza, chiqindi, qayta ishlangan va plastifikatsiyalangan poliuretan namunalari termogravimetrik tahlildan o'tkazildi. Tadqiqot davomida uretan ($-NH-CO-O-$), karbonil va efir bog'larining uzilishi, massa yo'qotilishi hamda parchalanish tezligi kabi xususiyatlar o'rganildi. Toza poliuretan namunasida termik parchalanish $260,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ da, chiqindi poliuretan namunasida $268,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ da, qayta ishlangan poliuretan namunasida esa $293,4^{\circ}\text{C}$ da boshlanganligi aniqlandi. Plastifikatsiyalangan poliuretan namunalarida ushbu ko'rsatkichlar mos ravishda $184,0^{\circ}\text{C}$ va $244,3^{\circ}\text{C}$ gacha pasaygan.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Ushbu ilmiy tadqiqot ishida poliuretan chiqindilarini qayta ishlash va ularning termik barqarorligini aniqlash masalalari o'rganildi. Termoreaktiv tuzilishga ega poliuretanlarni mexanik qayta ishlash usullari orqali qayta ishlash samarasiz ekanligi ularni kimyoviy qayta ishlash, xususan, glikoliz, aminoliz, gidroliz va plastifikatsiyalash usullarini rivojlantirish zarurligini ko'rsatadi.

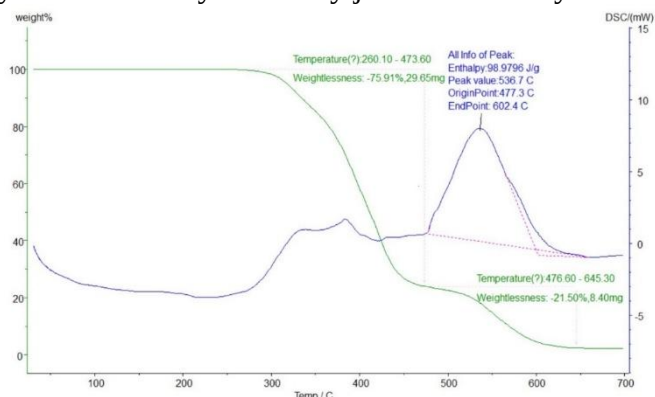
Adabiyotlarda poliuretanlarning termik xossalarini tadqiq etishda termogravimetrik tahlil (TGA) va differensial skanerlovchi kalorimetriya (DSC) eng ishonchli usullar sifatida e'tirof etilgan. Ko'pgina tadqiqotlarda poliuretanlarning termik destruksiya ikki yoki uch bosqichda sodir bo'lishi aniqlangan. Birinchi bosqich odatda 250–350°C oralig'ida uretan bog'larining (–NH–CO–O–) parchalanishi bilan tavsiflanadi. Ikkinchi bosqich 350–450°C oralig'ida poliefir segmentlari, shuningdek, karbonil (–COO–) va efir (–C–O–C–) bog'larining uzilishi natijasida polimerning asosiy zanjiri parchalanishi bilan kechadi. Yakuniy bosqich esa 450–650°C oralig'ida karbonlangan qoldiqning termo-oksidlanishi va karbonli strukturalarning destruksiya bilan tavsiflanadi. Poliuretanlarning termik parchalanishi davomida, asosan, CO₂, CO, NH₃, H₂O bug'i, shuningdek, izosiyanatlar, aminlar va boshqa past molekulyar uchuvchan organik birikmalar hosil bo'ladi. Ushbu gazlarning hosil bo'lish intensivligi polimerning kimyoviy tuzilishi, qattiq va yumshoq segmentlar nisbati hamda sintez texnologiyasiga bevosita bog'liq.

Ushbu tadqiqotda 4,4'-metilendifenildiizosiyanat asosida qayta sintez qilingan poliuretanlarning termik barqarorligi dastlabki materialnikiga yaqin ekanligi ko'rsatildi. Shuningdek, etilenglikol va glitserin kabi past molekulyar massali plastifikatorlardan foydalanish polimerning makromolekulyar harakatchanligini oshirishi, ichki kuchlanishlarni kamaytirishi hamda qayta ishlangan materiallarning fizik-mexanik xossalarini yaxshilashi aniqlandi. Plastifikator miqdori 1–3% oralig'ida tanlanganda termik barqarorlik deyarli saqlanib qolishi bilan birga, elastiklik va deformatsiyalanish qobiliyatining ortishi kuzatildi.

Tajriba jarayonida toza, chiqindi, qayta ishlangan va plastifikatsiyalangan poliuretan

namunalari TG–DSC usulida tahlil qilindi. Har bir namunaning massasi 8–12 mg qilib tayyorlandi. Tahlillar 50–700°C harorat oralig'ida, 10°C/min qizdirish tezligida va 50 ml/min sarf tezligiga ega azot atmosferasida olib borildi. TG egri chiziqlari asosida parchalanishning boshlanish harorati, massa yo'qotilishi va qoldiq miqdori, DSC egri chiziqlari asosida esa maksimal issiqlik oqimi va entalpiya (ΔH) aniqlandi [3, 4].

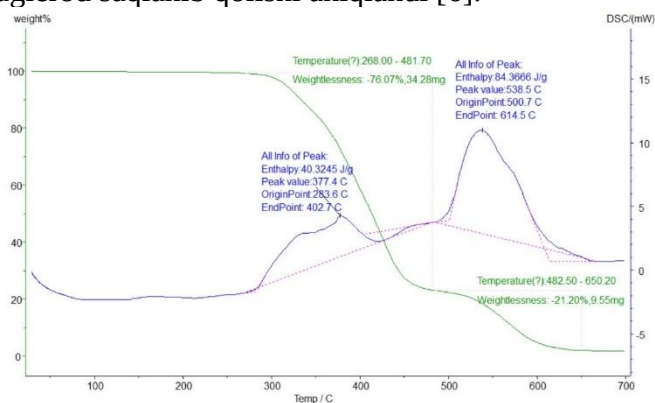
Natijalar. Poliuretan namunalarning termik xossalarini aniqlash maqsadida toza poliuretan (PU-1), chiqindi poliuretan (PU-2), qayta ishlangan poliuretan (PU-3) hamda plastifikatsiyalangan poliuretan namunalari (PU-4 va PU-5) termogravimetrik (TG) va differensial skanerlovchi kalorimetriya (DSC) usullarida tahlil qilindi. Olingan natijalar poliuretanlarning termik parchalanish mexanizmi, molekulyar tuzilishidagi o'zgarishlar va qayta ishlash hamda plastifikatsiyalash jarayonlarining termik barqarorlikka ta'sirini aniqlash imkonini berib uning natijalari Asosiy termik destruksiya 184–293°C oralig'ida boshlanib PU-1 namunasida parchalanish 260,1°C, PU-2 268,0°C, PU-3 293,4°C, PU-4 va PU-5larning parchalanishning boshlanish harorati 184,0°C va 244,3°C larga to'g'ri kelishi aniqlandi. Qayta ishlangan poliuretan eng yuqori termik barqarorlikni namoyon etgan bo'lsa, plastifikatsiyalangan polimer segmentlarining harakatchanligini oshirib, dastlabki termik destruksiya haroratini pasaytirdi[5]. Olingan natijalar poliuretan chiqindilarini qayta ishlash orqali yuqori issiqlik va yedrilishga chidamli kompozitsion materiallar yaratish imkoniyatini ilmiy jihatdan ifodalaydi.



1-rasm. Toza poliuretan namunasining termogravimetrik tasviri.

Yuqoridagi natijalar asosida toza poliuretan

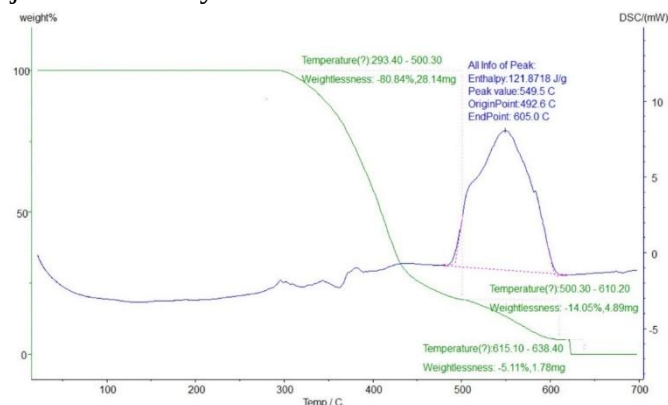
namunasi 260°C gacha yuqori termik barqarorlikka ega ekanligi aniqlandi. Asosiy termik destruksiya 260–474°C oralig'ida sodir bo'lib, bunda namuna massasining 75,91% ga kamayishi kuzatildi. Ushbu jarayon uretan (–NH–CO–O–), poliol va efir bog'larining uzilishi, shuningdek, CO₂, CO, NH₃ va boshqa uchuvchan mahsulotlarning hosil bo'lishi bilan tavsiflanadi. 476–645°C oralig'ida karbonlangan qoldiqning oksidlanishi natijasida massa yana 21,50% ga kamaydi. DSC egri chizig'ida 536,7 °C da kuzatilgan maksimum pik va 98,98 J/g entalpiya qiymati aromatik poliuretan qoldiqlarining chuqur termik parchalanishini ko'rsatdi. Umumiy massa yo'qotilishi 97% dan ortiq bo'lib, oxirgi qattiq qoldiq tarkibida 2–3% uglerod saqlanib qolishi aniqlandi [6].



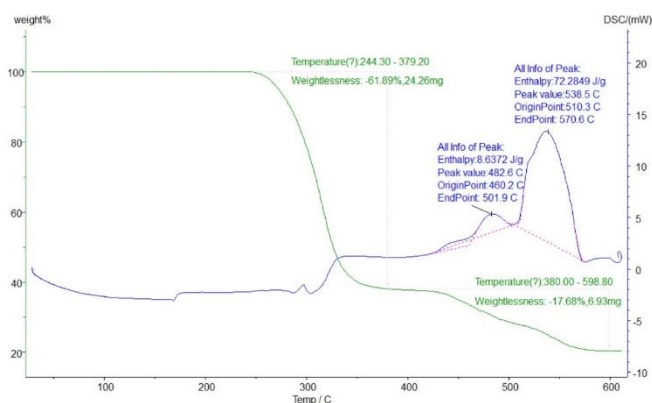
2-rasm. Chiqindi poliuretan namunasining termogravometrik tasviri.

Yuqoridagi rasmda chiqindi poliuretan namunasi 268°C gacha termik barqarorlikka ega ekanligini ko'rishimiz mumkin. Asosiy termik destruksiya 268,0–481,7°C oralig'ida sodir bo'lib, bunda namuna massasining 76,07% ga kamaygani aniqlandi. Ushbu bosqich uretan (–NH–CO–O–), ester va efir bog'larining uzilishi, shuningdek, CO₂, CO, NH₃ va boshqa uchuvchan mahsulotlarning ajralishi bilan tavsiflanadi. DSC egri chizig'ida 377,4°C da kuzatilgan birinchi endotermik pik (40,32 J/g) yumshoq segmentlar va uretan bog'larining parchalanishini, 538,5°C dagi asosiy pik (84,37 J/g) esa karbonlangan aromatik qoldiqlarning chuqur termik destruksiyasini ifodalaydi. 482,5–650,2°C oralig'ida qo'shimcha 21,20% massa yo'qolib, umumiy massa yo'qotilishi 97 % dan ortiq qiymatga yetadi [7]. Toza poliuretan bilan solishtirilganda, parchalanish haroratining biroz yuqorilashi va entalpiyaning kamayishi

chiqindi poliuretan tarkibida ekspluatatsiya yoki eskirish natijasida hosil bo'lgan ko'ndalang bog'lanishlar hamda karbonlangan strukturalar mavjudligini ko'rsatadi. Bu natijalar chiqindi poliuretan namunasining termik qayta ishlash yoki piroliz jarayonlariga yaroqli ekanligini ilmiy jihatdan asoslaydi.



3-rasm. Qayta ishlangan poliuretan namunasining termogravometrik tasviri.

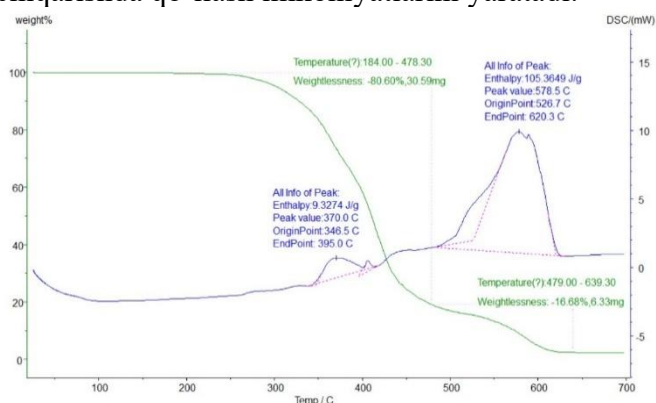


4-rasm. Plastifikatsiyalangan poliuretan namunasining termogravometrik tasviri.

TG–DSC tahlillari qayta ishlangan poliuretan namunasining termik barqarorligi toza va chiqindi poliuretan namunalari bilan solishtirganda yaxshilanganligini ko'rsatadi. Buning asosiy sababi qayta ishlash jarayonida 4,4-metilendifenildiizosianat oligomerining kiritilishi va polimerlanish natijasida yangi bog'larning hosil bo'lishidir. Ushbu bog'larni uzish uchun qo'shimcha energiya talab qilinishi aniqlandi. Parchalanishning 293,4°C da boshlanishi va asosiy destruksiyaning 293,4–500,3°C oralig'ida sodir bo'lishi qayta ishlash natijasida hosil bo'lgan polimer tuzilmasining issiqlikka chidamliligi ortganini tasdiqlaydi. 549,5°C dagi DSC

maksimumi va 121,87 J/g entalpiya qiymati karbonlangan strukturalarning parchalanishi uchun ko'proq energiya talab qilinishini ko'rsatadi [8]. Bu natijalar qayta ishlangan poliuretanning yuqori haroratlarda ishlaydigan buyumlar, abraziv muhitda xizmat qiluvchi detallar va yeyrilishga bardoshli materiallar ishlab chiqarishda samarali qo'llanilishi mumkinligini ilmiy jihatdan asoslaydi.

Poliuretan materialini plastifikatsiyalashda plastifikator sifatida etilenglikol qo'llanilgan bo'lib, uning termik xossalari tahlili ikki asosiy bosqichda kechishini ko'rishimiz mumkin. Bunda 244,3–379,2°C oralig'ida uretan, poliol va efir bog'larining uzilishi natijasida namunaning massasida 61,89% ga kamayish kuzatilgan. Keyingi 380,0–598,8°C oralig'ida esa karbonlangan aromatik qoldiqlarning parchalanishi hisobiga massa qo'shimcha ravishda 17,68% ga kamaygani aniqlandi. DSC egri chizig'ida 482,6°C (8,64 J/g) va 538,5°C (72,28 J/g) haroratlarda kuzatilgan o'zgarishlar, mos ravishda, oraliq karbonlangan mahsulotlarning hosil bo'lishi va ularning chuqur termik destruksiyasini ifodalaydi. Grafikda 600°C da taxminan 17,68% qattiq qoldiqning saqlanib qolishi plastifikatsiyalangan poliuretan tarkibida karbonlangan faza yoki noorganik komponentlar nisbatan yuqori ulushga ega ekanligini ko'rsatadi [9]. Bu natijalar ushbu materialni yuqori haroratli ekspluatatsiya sharoitlarida hamda yeyrilishga chidamli kompozitsion materiallar ishlab chiqarishda qo'llash imkoniyatlarini yaratadi.



5-rasm. Plastifikatsiyalangan poliuretan namunasining termogravometrik tasviri.

Ushbu namunada plastifikator sifatida glitserin qo'llanilgan bo'lib, uning namunaning termik xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlandi. Parchalanishning 184,0°C da boshlanishi

plastifikatorning past molekulyar fraksiyalari va yumshoq segmentlarining dastlabki termik parchalanishi bilan bog'liq. 184,0–478,3°C oralig'ida namuna massasining 80,60% ga kamayishi kuzatildi; ushbu bosqichda uretan, poliol hamda efir bog'larining uzilishi aniqlandi. DSC egri chizig'ida 370,0°C dagi kichik pik (9,33 J/g) plastifikatorning parchalanishini, 578,5°C dagi asosiy pik (105,36 J/g) esa karbonlangan aromatik qoldiqlarning chuqur termik destruksiyasini ko'rsatadi. 479,0–639,3°C oralig'ida qo'shimcha 16,68% massa yo'qotilishi natijasida namunaning deyarli barcha organik qismi parchalanadi [10]. Ushbu natijalar plastifikator poliuretanning past haroratdagi segmentlarini harakatchanroq qilish bilan birga, yuqori haroratlarda hosil bo'ladigan karbonlangan qoldiqning barqarorligini ham saqlab qolishini ko'rsatadi. Bu esa plastifikatsiyalangan poliuretan qayta ishlash texnologiyalarida elastik va yeyrilishga chidamli material sifatida foydalanish mumkinligini ilmiy jihatdan asoslaydi.

1-jadval

Poliuretan namunalarining asosiy termik parametrlari

№	Temperatura, °C	Massa yo'qotilishi, %					Parchalanish tezligi, mg/min					Sarflanadigan energiya miqdori (J/g)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	50	1,925	1,310	4,87	3,33	2,32	0,126	0,122	0,101	0,133	0,133	1,43	1,33	1,89	1,40	1,27
2	100	3,611	2,911	6,63	6,87	3,81	0,461	0,402	0,320	0,312	0,308	2,88	2,62	2,12	2,02	1,98
3	150	6,311	5,889	14,82	11,43	5,71	0,564	0,631	0,452	0,684	0,567	2,48	2,36	3,86	2,48	2,44
4	200	9,101	8,932	21,36	17,07	15,30	0,656	0,696	0,511	0,736	0,613	2,61	1,98	4,20	2,71	3,01
5	250	29,72	13,02	30,19	19,98	21,21	3,021	3,023	2,017	2,021	2,311	3,23	3,12	3,41	3,33	4,43
6	300	38,33	17,10	36,42	27,33	35,70	3,233	3,321	2,783	3,238	3,237	6,98	6,62	7,36	3,98	6,62
7	350	36,64	20,21	43,87	34,37	47,43	3,884	3,391	3,012	3,983	3,281	7,62	7,09	8,03	6,32	7,32
8	400	63,22	41,29	59,90	61,89	34,22	4,114	4,198	3,856	6,211	6,281	7,52	7,63	8,76	7,58	7,56
9	450	75,91	57,56	74,08	50,73	68,77	3,884	4,253	4,976	5,076	8,12	8,23	8,07	8,12	6,28	
10	500	68,52	78,11	80,84	44,96	80,60	1,999	1,823	2,523	2,991	3,081	6,23	3,08	6,86	6,23	4,03
11	550	33,41	76,07	67,42	36,87	71,43	1,884	1,843	2,012	1,875	1,875	4,98	2,88	3,42	4,68	3,12
12	600	39,67	91,18	36,99	21,14	39,63	1,499	1,491	1,876	1,699	1,549	2,59	2,08	4,34	2,59	2,28
13	650	21,50	21,50	20,01	17,68	16,68	1,801	1,403	1,564	1,433	1,431	2,12	1,86	3,12	2,14	1,86
14	700	21,49	21,20	20,01	17,38	16,24	1,117	1,278	1,308	1,103	1,103	1,78	1,05	2,07	1,18	1,13

Bu yerda: PU-1 — toza, PU-2 — chiqindi, PU-3 — qayta ishlangan, PU-4 va PU-5 — plastifikatsiyalangan poliuretan namunalari.

Yuqoridagi jadval asosida quyidagi xulosaga kelishimiz mumkin: TG–DSC tahlillari poliuretan namunalarining termik xossalari ularning tarkibi va ishlov berish usuliga sezilarli darajada bog'liq ekanligini ko'rsatdi. Qayta ishlangan poliuretan eng yuqori termik barqarorlikka (293,4°C) va eng katta entalpiyaga (121,87 J/g) ega bo'lib, bu qayta ishlash jarayonida polimer tuzilmasining mustahkamlanganligini tasdiqlaydi. Toza va chiqindi poliuretan namunalari o'xshash termik xossalarga ega bo'lib, chiqindi poliuretanning qayta ishlash uchun istiqbolli xomashyo ekanligini ko'rsatadi. Plastifikatsiyalangan poliuretanlar dastlabki parchalanishni nisbatan past haroratlarda boshlasada, yuqori haroratlarda karbonlangan qoldiqning termik barqarorligini oshiradi [11]. Umuman

olganda, qayta ishlash va plastifikatsiya poliuretanlarning termik xossalarini maqsadli ravishda boshqarish imkonini beradi hamda ularni yuqori yedirilishga va issiqlikka chidamli materiallar ishlab chiqarishda qo'llash uchun ilmiy asos yaratadi.

Muhokama. Olib borilgan ilmiy tadqiqot ishida toza poliuretan (PU-1), poliuretan chiqindisi (PU-2), 4,4-metilendifenildizosiyat oligomeri asosida qayta ishlangan poliuretan (PU-3), qayta ishlangan ikkinchi namuna (PU-4), shuningdek, etilenglikol va glitserin bilan plastifikatsiyalangan poliuretan (PU-5) namunalarining termogravimetrik tahlil natijalari keltirilgan. Tahlil natijalariga ko'ra, 50°C haroratda barcha namunalarda massa yo'qotilishi 1,51–4,87% oralig'ida kuzatildi. Eng yuqori massa kamayishi PU-3 namunasida (4,87%), eng past qiymat esa PU-2 namunasida (1,51%) qayd etildi.

Mazkur bosqich fizik adsorbsiyalangan namlik hamda past molekulyar massali uchuvchan komponentlarning bug'lanishi bilan izohlanadi. Ushbu haroratda parchalanish tezligi 0,102–0,135 mg min⁻¹, issiqlik effekti esa 1,27–1,89 $\mu\text{V}\cdot\text{s mg}^{-1}$ ni tashkil etdi. Harorat 200–300°C gacha oshirilganda poliuretanlarning asosiy kimyoviy bog'larida termik parchalanish jarayoni boshlandi. 250°C haroratda massa yo'qotilishi PU-1 uchun 29,72%, PU-2 uchun 15,02%, PU-3 uchun 30,19%, PU-4 uchun 19,98% va PU-5 uchun 21,21% ni tashkil etdi. Ushbu bosqichda uretan (–NH–CO–O–) guruhlarining dissotsiatsiyasi natijasida izosiyat va spirt fragmentlari hosil bo'lib, CO₂ hamda boshqa uchuvchan mahsulotlar ajralib chiqishi kuzatiladi [12].

300–400°C oralig'i barcha namunalarda asosiy destruksiya bosqichi sifatida namoyon bo'ldi. 350°C haroratda PU-1 namunasi 56,64%, PU-3 — 45,87%, PU-4 — 54,37%, PU-5 esa 47,45 % massa yo'qotgan bo'lsa, chiqindi poliuretan (PU-2) atigi 30,21% massa yo'qotdi. 400°C haroratda massa kamayishi PU-1 uchun 63,22%, PU-2 uchun 41,29 %, PU-3 uchun 59,90%, PU-4 uchun 61,89% va PU-5 uchun 54,22% ni tashkil etdi. Mazkur bosqich polimerning asosiy zanjiridagi karbonil (–COO–) hamda efir (–C–O–C–) bog'larining uzilishi bilan tavsiflanadi. DTG natijalari ham aynan shu harorat oralig'ida parchalanish tezligining

maksimal qiymatlarini ko'rsatdi. 400°C haroratda parchalanish tezligi PU-1 namunasida 4,114 mg min⁻¹, PU-2 namunasida 4,198 mg min⁻¹, PU-3 namunasida 3,856 mg min⁻¹, PU-4 namunasida 6,211 mg min⁻¹, PU-5 namunasida esa 6,281 mg min⁻¹ ga yetdi.

Plastifikatsiyalangan namunalarda parchalanish tezligining yuqoriroq bo'lishi plastifikator molekularining makromolekulyar segmentlar o'rtasidagi o'zaro ta'sirni kamaytirishi hamda zanjirlarning harakatchanligini oshirishi bilan izohlanadi. 450–550°C oralig'ida karbonlangan qoldiqning termo-oksidlanishi kuzatildi. 500°C haroratda massa yo'qotilishi PU-1 uchun 68,52%, PU-2 uchun 78,11%, PU-3 uchun 60,84%, PU-4 uchun 44,96% va PU-5 uchun 80,60% ni tashkil etdi. Ayniqsa, PU-4 namunasida massa yo'qotilishining nisbatan pastligi qayta tiklangan poliuretan tarmog'ining termik barqarorligi yuqoriroq ekanligini ko'rsatadi.

DSC natijalariga ko'ra, issiqlik oqimi ham harorat oshishi bilan ortib bordi. 300 °C haroratda issiqlik effekti 5,98–7,56 $\mu\text{V}\cdot\text{s mg}^{-1}$, 400°C haroratda esa 7,63–8,76 $\mu\text{V}\cdot\text{s mg}^{-1}$ ni tashkil etdi [7]. Umuman olganda, olingan natijalar 4,4-MDI oligomeri asosida qayta ishlangan hamda etilenglikol va glitserin yordamida plastifikatsiyalangan poliuretanlarning termik xossalari dastlabki poliuretan xossalariga yaqinligini ko'rsatdi. Ayniqsa, PU-4 namunasida yuqori haroratlarda massa yo'qotilishining pastligi va qoldiqning nisbatan yuqori saqlanishi qayta ishlash jarayonida polimer tarmog'ining samarali tiklanganligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, plastifikatsiyalangan namuna (PU-5) segmentlar harakatchanligining ortishi sababli destruksiya tezligining yuqoriroq qiymatlarini namoyon etdi.

Xulosa. Olib borilgan termogravimetrik va differensial skanerlovchi kalorimetriya tahlillari natijasida toza poliuretan, chiqindi poliuretan, qayta ishlangan poliuretan hamda ikkita plastifikatsiyalangan poliuretan namunalarining termik xossalari aniqlandi.

Birinchi bosqich 184–293°C oralig'ida boshlanib, poliuretan makromolekulasidagi uretan (–NH–CO–O–), karbonil (–COO–) va efir (–C–O–C–) bog'larining uzilishi bilan izohlandi. Mazkur bosqich umumiy massa yo'qotilishining asosiy qismini, ya'ni 61,89–80,84% ni tashkil etdi.

Ikkinchi bosqich esa 380–650°C oraligʻida kuzatildi. Qayta ishlangan poliuretan namunasida qoʻshimcha uchinchi bosqich (615–638°C) qayd etilib, bu yuqori darajada karbonlangan qoldiqlarning sekin parchalanishi bilan izohlandi.

Plastifikatsiyalangan namunalarda asosiy DSC piki 578,5°C gacha siljigan. Bu plastifikatorning karbonlanish jarayoniga ham taʼsir koʻrsatishi natijasida yuqori haroratlarda hosil boʻlgan qoldiqning barqarorligi oshganini koʻrsatdi. Poliuretan namunalarning termik parchalanishi, avvalo, uretan bogʻlarining dissotsiatsiyasi, keyin polioli va efir segmentlarining uzilishi, yakuniy bosqichda esa aromatik uglevodorodlarning karbonlanishi va oksidlanishi orqali amalga oshishi

aniqlandi.

Qayta ishlash jarayonida hosil boʻlgan yangi molekulyar bogʻlanishlar termik barqarorlikni oshirgan, plastifikator qoʻshilishi esa polimerning elastikligini oshirib, past haroratlarda destruksiya jarayonini tezlashtirgan. Olib borilgan tahlillar qayta ishlangan poliuretan namunasi termik barqarorlik, parchalanish harorati va issiqlik yutish qobiliyati boʻyicha eng yuqori koʻrsatkichlarga ega ekanini koʻrsatdi. Shuningdek, chiqindi poliuretan namunasining termik xossalari toza poliuretanga juda yaqin ekani, plastifikatsiyalangan poliuretan namunalari esa yuqori elastiklikni hamda yuqori haroratlarda yetarli darajadagi termik barqarorlikni saqlab qolishi aniqlandi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR ROʻYXATI

- [1] Islomova, N. A. Q., & Qamariddin, O. (2022). Yuqori molekulyar birikmalarni fizik-kimyoviy tadqiqot usullari asosida oʻrganish. *Academic Research in Educational Sciences*, 3(2), 877–884.
- [2] Mendiburu-Valor, E., et al. (2023). Thermoset polyurethanes from biobased and recycled components. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(11), 4946–4959.
- [3] Eshmatov, A. M., et al. (2021). Dispers toʻldiruvchili polimer-polimer komplekslar asosidagi kompozitsion materiallar. *Academic Research in Educational Sciences*, 2(2), 334–341.
- [4] Mârşolea, A. C., et al. (2023). Design of polyurethane composites obtained from industrial plastic wastes, pyrite and red mud. *Construction and Building Materials*, 405, 133319.
- [5] Лутфуллаев, С. Ш., & Бекназаров, Э. М. (2021). Исследование физико-химических и механических свойств полимеров из промышленных отходов при их вторичной переработке. *Universum: технические науки*, 12(93). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12769>
- [6] Мазурин, В. Л. (2013). Полиуретан как конструкционный материал XXI века. *Глобальная энергия*, 2(171), 165–170.
- [7] Бакирова, И. Н., & Минеева, Т. А. (2024). Синтез термопластичного полиуретана с использованием в качестве удлинителя цепи ароматического диола и разработка на его основе клеевых композиций. *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*, 67(11), 106–113.
- [8] Shodiyev, A., Mukhiddinov, B., & Kiyomov, S. (2022). Effect of change of polyethropoliol amount on the physical-mechanical properties of thermoreactive polyurethane. *Universum: технические науки*, 10(103). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14396>
- [9] Abu-Jdayil, B., et al. (2022). Utilization of polyurethane foam dust in development of thermal insulation composite. *Buildings*, 12(2), 126.
- [10] Xoʻjaqulov, K. R., et al. (2023). Ikkilamchi polimer chiqindilarini granulalash va ularni qayta ishlash. *Science and Education*, 4(6), 418–423.
- [11] Shaker, A., et al. (2023). Thermo-mechanical characterization of electrospun polyurethane/carbon-nanotubes nanofibers: A comparative study. *Scientific Reports*, 13(1), 17368.
- [12] Захаров, А. Е. (2025). Термогравиметрический анализ наномодифицированного материала для внешнего огнезащитного слоя оболочек полимерных эластичных резервуаров. *Современные проблемы гражданской защиты*, 4(57), 19–28.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Shodiyev, A. F., Mukhiddinov, B. F., Jo'rayev, S. T., & Shokirov, R. Q. (2026). Sof, chiqindi, qayta ishlangan va plastifikatsiyalangan poliuretan namunalarining qiyosiy termogravimetrik tahlili. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.38>

UO'K: 67.08:347.218.1

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.39

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

4,4'-METILENDIFENILDIIZOSIYANAT ASOSIDAGI POLIURETANLARNING QOVUSHQOQLIK XOSSALARI VA MAKROMOLEKULYAR TAVSIFLARINI VISKOZIMETRIK USULDA TADQIQ ETISH



**Shodiev Asliddin
Faxriddin o'g'li**

T.f.f.d. (PhD), Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Agromuhandislik va
kommunikatsion texnologiyalar
fakulteti dekan o'rinbosari, Navoiy,
O'zbekiston
E-mail:
shodiyevasliddin22@gmail.com
ORCID ID: 0009-0006-7776-1950
Science ID: FNV-0525-0014



**Muhiddinov Bahodir
Fahriddinovich**

K.f.d., professor, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Kimyoviy texnologiya
kafedrasini, Navoiy, O'zbekiston
E-mail: muhiddinov.b@mail.ru
ORCID ID: 0009-0006-2411-2914
Science ID: DBX-0525-0007



**Jo'rayev Shoxruh
To'liqinovich**

T.f.d., professor, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Agromuhandislik va
kommunikatsion texnologiyalar
fakulteti dekani, Navoiy,
O'zbekiston
E-mail: shoxa299090@gmail.com
ORCID ID: 0009-0002-0839-5994
Science ID: FBX-0325-0004



**Shokirov Ravshan
Qahramonovich**

Tayanch doktorant, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Agronomiya kafedrasini,
Navoiy, O'zbekiston
E-mail:
shokirovravshan178@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-8218-7599
Science ID: MBX-1125-0014

Annotatsiya. Ushbu maqolada 4,4'-metilendifenildiizosianat asosidagi poliuretanlarning qovushqoqlik xossalari va makromolekulyar tavsiflari viskozimetrik usul yordamida tadqiq etilgan. 4,4'-metilendifenildiizosianatning 1,2-dixloretrandagi 0,125; 0,25; 0,50 va 1,0% konsentratsiyali eritmaları tayyorlanib, ularning nisbiy, solishtirma, keltirilgan, logarifmik va xarakteristik qovushqoqliklari aniqlangan. Olingan ma'lumotlar Mark–Kun–Xauvink–Sakurada tenglamasi asosida qayta ishlanib, qovushqoqlik bo'yicha o'rtacha molekulyar massa hisoblangan. Tadqiqot natijalari eritma konsentratsiyasining ortishi bilan keltirilgan qovushqoqlik qiymatlari oshishini ko'rsatdi. Shuningdek, erituvchi tabiati va konsentratsiyaning makromolekulalarning gidrodinamik hajmi, konformatsion holati va molekulalararo o'zaro ta'sirlariga ta'siri baholandi. Olingan natijalar poliuretan sintezi texnologik sharoitlarini optimallashtirish va yuqori ekspluatatsion xususiyatlarga ega polimer materiallarni olish uchun ilmiy asos yaratadi.

Kalit so'zlar: 4,4'-metilendifenildiizosianat, poliuretan, poliefirpoliol, viskozimetriya, qovushqoqlik, xarakteristik qovushqoqlik, molekulyar massa, Mark–Kun–Xauvink–Sakurada tenglamasi, 1,2-dixlorethan, polikondensatsiya, makromolekula, gidrodinamik hajm.

Received: 19.08.2026

Accepted: 19.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТНЫХ СВОЙСТВ И МАКРОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИУРЕТАНОВ НА ОСНОВЕ 4,4'-МЕТИЛЕНДИФЕНИЛДИИЗОЦИАНАТА ВИСКОЗИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**Шодиев Аслиддин
Фахриддин угли**

PhD по техническим наукам,
заместитель декана факультета
агроинженерии и
коммуникационных технологий
Навоийского государственного
горно-технологического
университета, Навои,
Узбекистан

**Мухиддинов Баходир
Фахриддинович**

Кандидат химических наук,
профессор кафедры химической
технологии Навоийского
государственного горно-
технологического университета,
Навои, Узбекистан

**Жураев Шохрух
Тулкинович**

Доктор технических наук,
профессор, декан факультета
агроинженерии и
коммуникационных технологий
Навоийского государственного
горно-технологического
университета, Навои,
Узбекистан

**Шокиров Равшан
Кахрамонович**

Базовый докторант кафедры
агрономии Навоийского
государственного горно-
технологического университета,
Навои, Узбекистан

Аннотация. В статье исследованы вязкостные свойства и макромолекулярные характеристики полиуретанов на основе 4,4'-метиленидифенилдиизоцианата с использованием вискозиметрического метода. Были приготовлены растворы 4,4'-метиленидифенилдиизоцианата в 1,2-дихлорэтане с концентрациями 0,125; 0,25; 0,50 и 1,0%, для которых определены относительная, удельная, приведённая, логарифмическая и характеристическая вязкости. Полученные вискозиметрические данные обработаны с использованием уравнения Марка–Куна–Хаувинка–Сакурады, на основании которого рассчитана средневязкостная молекулярная масса. Установлено, что с увеличением концентрации раствора значения приведённой вязкости возрастают. Кроме того, оценено влияние природы растворителя и концентрации на гидродинамический объём, конформационное состояние макромолекул и межмолекулярные взаимодействия. Полученные результаты создают научную основу для оптимизации технологических условий синтеза полиуретанов и получения полимерных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: 4,4'-метиленидифенилдиизоцианат, полиуретан, полиэфирполиол, вискозиметрия, вязкость, характеристическая вязкость, молекулярная масса, уравнение Марка–Куна–Хаувинка–Сакурады, 1,2-дихлорэтан, поликонденсация, макромолекула, гидродинамический объём.

VISCOSITY PROPERTIES AND MACROMOLECULAR CHARACTERISTICS OF POLYURETHANES BASED ON 4,4'-METHYLENEDIPHENYL DIISOCYANATE STUDIED BY THE VISCOMETRIC METHOD

**Shodiev Asliddin
Fakhriddin ugli**

PhD in Technical Sciences, Deputy
Dean of the Faculty of
Agroengineering and
Communication Technologies,
Navoi State University of Mining
and Technologies, Navoi,
Uzbekistan

**Muhiddinov Bahodir
Fakhriddinovich**

Candidate of Chemical Sciences,
Professor, Department of Chemical
Technology, Navoi State University
of Mining and Technologies, Navoi,
Uzbekistan

**Jurayev Shokhruh
Tulkinovich**

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Dean of the Faculty of
Agroengineering and
Communication Technologies,
Navoi State University of Mining
and Technologies, Navoi,
Uzbekistan

**Shokirov Ravshan
Kahramonovich**

Basic Doctoral Student,
Department of Agronomy, Navoi
State University of Mining and
Technologies, Navoi, Uzbekistan

Abstract. This article investigates the viscosity properties and macromolecular characteristics of polyurethanes based on 4,4'-methylenediphenyl diisocyanate using a viscometric method. Solutions of 4,4'-methylenediphenyl diisocyanate in 1,2-dichloroethane at concentrations of 0.125, 0.25, 0.50, and 1.0% were prepared, and their relative, specific, reduced, logarithmic, and intrinsic viscosities were determined. The obtained viscometric data were processed using the Mark–Kuhn–Houwink–Sakurada equation to calculate the viscosity-average molecular weight. The results demonstrated that the reduced viscosity increases with increasing solution concentration. In addition, the effects of solvent nature and concentration on the hydrodynamic volume, conformational state of macromolecules, and intermolecular interactions were evaluated. The obtained results provide a scientific basis for optimizing polyurethane synthesis conditions and developing polymer materials with improved performance characteristics.

Keywords: 4,4'-methylenediphenyl diisocyanate, polyurethane, polyether polyol, viscometry, viscosity, intrinsic viscosity, molecular weight, Mark–Kuhn–Houwink–Sakurada equation, 1,2-dichloroethane, polycondensation, macromolecule, hydrodynamic volume.

Kirish. Bugungi kunda ishlab chiqarish tarmoqlarini polimer materiallar va ularning kompozitsiyalarisiz tasavvur etib bo'lmaydi. Aynan ushbu sinfga kiruvchi termoreaktiv poliuretanlarni olishda katta ahamiyatga ega bo'lgan 4,4'-metilendifenildiizosianatning qovushqoqlik xossalari o'rganish ushbu polimerdan tayyorlangan ehtiyot qismlarning ishlash muddatini oshirishga xizmat qiladi. Termoreaktiv poliuretanlar, asosan, tog'-kon, kimyo va metallurgiya sanoatida qo'llanilishi bilan bir qatorda, metallarda korroziyaning oldini olishda ham ishlatiladi [1, 2]. Sanoat korxonalarida keng ko'lamda foydalaniladigan polimerlardan biri bo'lgan poliuretan materiallarini olishda qo'llaniladigan 4,4'-metilendifenildiizosianatning qovushqoqligi va molekulyar massasini tadqiq qilish ushbu polimerning qo'llanilish sohalarini yanada kengaytirish imkonini beradi. Termoreaktiv poliuretanlarning ekspluatatsion xususiyatlari polikondensatsiya jarayonida hosil bo'ladigan makromolekulyar tuzilish, ko'ndalang bog'lanish zichligi, qattiq va yumshoq segmentlar nisbati hamda dastlabki reagentlarning fizik-kimyoviy xossalari bevosita bog'liqdir [3]. Shu nuqtai nazardan, poliuretan sintezida asosiy komponentlardan biri hisoblangan 4,4'-metilendifenildiizosianatning eritmadagi xossalari, qovushqoqligi va molekulyar xarakteristikalarini tadqiq qilish polikondensatsiya kinetikasini boshqarish hamda yuqori sifatli poliuretan materiallarini olishda muhim ahamiyat kasb etadi. Polimer eritmalarining viskozimetrik tahlili makromolekulalarning gidrodinamik hajmi, zanjir konfiguratsiyasi, solvatatsiya darajasi va molekulyar massasini baholashning eng samarali eksperimental usullaridan biri hisoblanadi. Nisbiy (η_{sp}), solishtirma (η_{sp}/c), keltirilgan (η_{rel}), logarifmik ($\log \eta$) va xarakteristik qovushqoqlik ($[\eta]$) ko'rsatkichlari erituvchi–polimer o'zaro ta'sirini, makromolekulyar zanjirning konformatsiyasini hamda eritmadagi molekulalar harakatchanligini tavsiflaydi. Shu munosabat bilan mazkur tadqiqotning maqsadi poliuretanlar

polikondensatsiyasida qo'llaniladigan 4,4'-metilendifenildiizosianat eritmalarining turli organik erituvchilardagi viskozimetrik parametrlarini aniqlash, erituvchi tabiatining fizik-mexanik xususiyatlarga ta'sirini o'rganish hamda Mark–Xauvink–Sakurada tenglamasi asosida ularning qovushqoqlik bo'yicha o'rtacha molekulyar massasini hisoblashdan iborat. Olingan natijalar poliuretan sintezi kinetikasini optimallashtirish, makromolekulyar tuzilishini tadqiq qilish va yuqori ekspluatatsion xususiyatlarga ega poliuretan kompozitsiyalarini ishlab chiqarish imkonini beradi [4].

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Termoreaktiv poliuretanlarni sintez qilishda qo'llaniladigan 4,4'-metilendifenildiizosianatning molekulyar massasi va qovushqoqlik xususiyatlari polimerlanish kinetikasi, makromolekulyar zanjir uzunligi hamda hosil bo'ladigan poliuretan tarmog'ining fizik-mexanik xossalari belgilovchi asosiy parametrlardan hisoblanadi. Xalqaro tadqiqotlarda poliuretanlarning reologik va gidrodinamik xususiyatlarini aniqlashda kapillyar viskozimetriya eng ishonchli va keng qo'llaniladigan usullardan biri sifatida e'tirof etilgan. Ushbu usul yordamida ichki (xarakteristik) qovushqoqlik ($[\eta]$) qiymatini aniqlash imkoniyati mavjud. Olib borilgan tadqiqotlar asosida Mark–Xauvink–Sakurada tenglamasi yordamida xarakteristik qovushqoqlik va o'rtacha molekulyar massa (M_v) o'rtasidagi bog'liqlik tadqiq qilindi. Elsevier, Springer va Wiley nashrlarida chop etilgan bir qator ilmiy ishlarga ko'ra, 1,4-dioksan, aseton va 1,2-dixlorethan kabi organik erituvchilarning qutbliligi hamda solvatlanish qobiliyati polimer makromolekulalarining gidrodinamik hajmi va konformatsion harakatchanligiga turlicha ta'sir ko'rsatadi. Natijada nisbiy (η_{sp}), solishtirma (η_{sp}/c), keltirilgan (η_{rel}) va logarifmik ($\log \eta$) qovushqoqlik qiymatlarining konsentratsiya hamda erituvchi tabiatiga bog'liq ravishda o'zgarishi tahlil qilindi [5, 6].

Termoreaktiv poliuretanlar sintezi 4,4'-metilendifenil diizosianat hamda poliefir

poliollarning polikondensatsiya reaksiyasi asosida amalga oshiriladi. Reaksiya jarayonida izosianat (–NCO) va gidroksil (–OH) funksional guruhlar o‘zaro ta’sirlashib, yuqori energiyali uretan bog‘lari (–NHCOO–) hosil qiladi. Polimerlanish jarayoni 75–85°C haroratda, mexanik aralashtirish tezligi 300–500 ayl/min bo‘lgan sharoitda amalga oshirildi. Zanjir o‘stiruvchi sifatida 1,4-butandiol qo‘llanilib, uning miqdori 3–8%, 4,4'-metilendifenildiizosianat ulushi esa 60–75% doirasida o‘zgartirildi [7].

Reaksiya muhitida namlik ta’sirini bartaraf etish maqsadida xomashyolar 60–80°C haroratda vakuum sharoitida quritildi va degazatsiya qilindi. Sintez qilingan namunalarning reologik va molekulyar xususiyatlari kapillyar viskozimetr yordamida, 0,125; 0,25; 0,5 va 1,0% konsentratsiyalarda tayyorlangan eritmalar asosida, 25±0,1°C haroratda, erituvchi sifatida 1,2-dixloretan qo‘llanilgan holda aniqlandi [8].

Natijalar. Poliuretan hosil qilishda qo‘llaniladigan 4,4'-metilendifenil diizosianatning nisbiy, solishtirma, keltirilgan va logarifmik qovushqoqliklari hamda molekulyar massasi viskozimetrik usulda aniqlandi [8].

4,4'-Metilendifenil diizosianatning 1,2-dixloretandagi suyultirilgan eritmaları VPJ-1 tipidagi viskozimetr yordamida tekshirildi. VPJ-1 tipidagi viskozimetr shaffof suyuqliklarning turli haroratlardagi kinematik hamda dinamik qovushqoqligini o‘lchashga asoslangan [9].

Viskozimetr yordamida qovushqoqlikni o‘lchash suyuqlik hajmining o‘lchov rezervuaridan kapillyar orqali oqib o‘tishi uchun zarur bo‘lgan vaqtni aniqlashga asoslanadi. Bunda kapillyar diametri ($d = 0.54$) mm, doimiy konstantasi ($K=0,008683$) mm²/s² va o‘lchov diapazoni $g = 2-10$ mm²/s bo‘lgan viskozimetr yordamida xona haroratida eritmalarining nisbiy η_{nis} , solishtirma η_{sol} , keltirilgan η_{kel} va logarifmik η_{log} qovushqoqliklari aniqlandi. Bundan tashqari, viskozimetr yordamida suyuqliklarning kinematik hamda dinamik qovushqoqliklarini ham hisoblash mumkin bo‘lib, ular quyidagi formulalar yordamida aniqlanadi [10].

Nisbiy qovushqoqlikni hisoblash formulasi

$$\eta_{nis} = \frac{t_1}{t_0} \quad (1)$$

Solishtirma qovushqoqlikni hisoblash

formulasi

$$\eta_{st} = \eta_{nis} - 1 \quad (2)$$

Keltirilgan qovushqoqlikni hisoblash formulasi

$$\eta_{kel} = \frac{\eta_{st}}{C} \quad (3)$$

Logarifmik qovushqoqlikni hisoblash formulasi

$$\eta_{log} = \frac{\ln \eta_{nis}}{C} \quad (4)$$

Quyidagi jadvalda yuqoridagi formulalar asosida hisoblangan qovushqoqliklar qiymatlari keltirilgan [11].

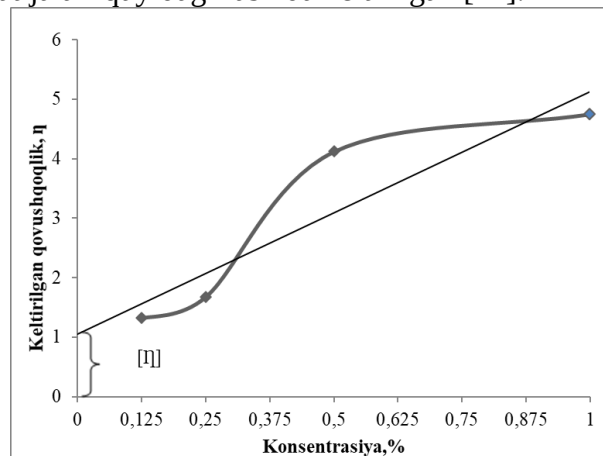
1-jadval

Poliefirpoliol eritmasining viskozimetrdan o‘tish vaqti va qovushqoqliklari

№	Eritma konsentratsiyasi, %	Eritmaning o‘rtacha o‘tish vaqti, to‘rt sek	$\eta_{nis} = \frac{t_1}{t_0}$	$\eta_{st} = \eta_{nis} - 1$	$\eta_{kel} = \frac{\eta_{st}}{C}$	$\eta_{log} = \frac{\ln(\eta_{nis})}{C}$	[η]
1	1,2-dixloretan	172,66	—	—	—	—	—
2	0,125	285,26	1,34	0,34	2,72	2,34	1,03
3	0,25	368,54	1,73	0,73	2,92	2,20	—
4	0,5	587,20	2,75	1,75	3,50	2,02	—
5	1,0	1001,28	4,70	3,70	3,70	1,55	—

Bu yerda: τ — eritmaning kapillyardan o‘rtacha o‘tish vaqti, η_{nis} — nisbiy qovushqoqlik, η_{sol} — solishtirma qovushqoqlik, η_{kel} — keltirilgan qovushqoqlik, η — logarifmik qovushqoqlik, $[\eta]$ — xarakteristik qovushqoqlik.

Yuqoridagi jadvalda keltirilgan natijalar asosida eritmaning xarakteristik qovushqoqligi bilan eritma konsentratsiyasi orasidagi bog‘liqlik natijalari quyidagi rasmda keltirilgan [12].



1-rasm. Keltirilgan qovushqoqlikning eritmaning konsentratsiyasiga bog‘liqligi.

Olingan natijalar tahlilidan (rasm) ko‘rinib turibdiki, eritmalar konsentratsiyasining ortishi bilan ularning keltirilgan qovushqoqlik qiymatlari ham oshib boradi. Buning asosiy sababi eritma molekulalarining ichki harakatchanligi natijasida yuzaga keladigan ishqalanishning o‘zgarishidir

[12].

Muhokama. Hozirgi vaqtda yuqori molekulyar birikmalarning molekulyar massasini aniqlash uchun xarakteristik qovushqoqlikning molekulyar massaga bog'liqligini ifodalovchi Mark–Kun–Xauvink tenglamasidan foydalaniladi.

$$[\eta] = KMa \quad (5)$$

Bu yerda K va α — ma'lum bir haroratda polimer–erituvchi sistemasi uchun doimiy kattaliklar hisoblanadi. Odatda, ular erituvchi va polimerning tabiatiga bog'liq bo'lib, α ning qiymati 0,5–2,0 oralig'ida bo'ladi.

Qo'llanmalardagi ma'lumotlarga asosan, 4,4'-metilendifenil diizosianatning 1,2-dixloretrandagi suyultirilgan eritmasi uchun K va α qiymatlari $K = 1,62 \cdot 10^{-4}$ va $\alpha = 0,8$ ga teng [14, 15].

Yuqoridagi Mark–Kun–Xauvink tenglamasi [5] asosida poliefirpoliolning o'rtacha molekulyar massasi aniqlandi.

$$1,02 = 1,62 \cdot 10^{-4} \cdot M_{0,8}; M_{0,8} = 6296$$

$$M = 1094$$

Demak, 4,4'-metilendifenildiizosianatni 1,2-dixloretrandagi eritmasi uchun o'rtacha molekulyar massa 1094 g/mol ga teng bo'lgan poliefirpoliol namunasidan foydalanildi.

Xulosa. Kapillyar viskozimetriya usuli orqali termoreaktiv poliuretanlar sintezida qo'llaniladigan 4,4'-metilendifenildiizosianatning reologik va molekulyar xususiyatlari hamda 1,2-dixlorethan muhitida tayyorlangan 0,125; 0,25; 0,5 va 1,0% konsentratsiyali eritmaları asosida nisbiy (η_{nis}), solishtirma (η_{st}), keltirilgan (η_{kel}), logarifmik (η_{log}) va xarakteristik qovushqoqlik ($[\eta]$) qiymatlari aniqlandi. Viskozimetrik tahlillar natijasida poliefir-poliolning xarakteristik qovushqoqligi $[\eta] = 1,03 \text{ mm}^2/\text{s}$, qovushqoqlik bo'yicha o'rtacha molekulyar massasi esa (M_v) = $1094 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ekanligi hisoblab topildi. Olingan natijalar 4,4'-metilendifenildiizosianat makromolekulalarining erituvchi muhitida yuqori darajada solvatlanishini, optimal gidrodinamik hajm hosil qilishini va polimer zanjirlarining konformatsion harakatchanligi saqlanishini ko'rsatdi. Shuningdek, viskozimetrik parametrlar asosida aniqlangan molekulyar massa poliuretan sintezi jarayonida uretan bog'lari ($-\text{NHCOO}-$)ning samarali shakllanishini hamda materialning keyingi fizik-mexanik va termomexanik xususiyatlari yaxshilanishini ko'rsatdi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Сафаров, А. М. У., et al. (2024). Исследование физико-механических свойств полиуретана, полученных на основе карбамида и глицерина. *Universum: технические науки*, 6(5(122)), 62–65.
- [2] Cruz, J. A., et al. (2024). Predicting viscosity in polyurethane polymerization for liquid composite molding using neural networks and surface methodology. *Polymer Bulletin*, 81(9), 8341–8358.
- [3] Шокиров, Л. Б., & Рахимов, Х. К. (2023). Модификация крахмаллинга елимланишига турли электролитларнинг таъсирини ўрганиш. *Golden Brain*, 1(7), 48–52.
- [4] Hasanov, B. (2026). Polimer va uglerod nanotolali modifikatorlar asosida bitum kompozitsiyalarining reologik, mikrotuzilmaviy va adgezion xossalarini takomillashtirishning qiyosiy tahlili. *Muhandislik va iqtisodiyot*, 4.
- [5] Xo'jaqulov, K. R., et al. (2023). Ikkilamchi polimer chiqindilarini granulalash va ularni qayta ishlash. *Science and Education*, 4(6), 418–423.
- [6] Fayzullayevna, G. A. A., Boboxonov, G. M. S., & Babaxan, M. (2025). Asfaltobeton qoplamalari uchun rezina kukuni va elastomerlarni modifikatsiyalash asosida polimer-bitum kompozitsiyalarini olish. *Sanoatda raqamli texnologiyalar / Цифровые технологии в промышленности*, 3(3), 152–155.
- [7] Khalafvandi, S. A., Pazokian, M. A., & Fathollahi, E. (2022). The investigation of viscometric properties of the most reputable types of viscosity index improvers in different lubricant base oils: API groups I, II, and III. *Lubricants*, 10(1), 6.
- [8] Шодиев, А. Ф. (2023). Изучение влияния количества 4,4-метилдифенилдиизоцианата при переработке термореактивных полиуретановых отходов. *International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences*, 4(4), 47–51.

- [9] Захарова, Д. В., et al. (2024). Древесные пластики на основе метилendifенилдиизоцианата и касторового масла. Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века, 134–140.
- [10] Захарян, Е. М., & Максимов, А. Л. (2022). Пиролиз полиуретанов. Особенности процесса и состав продуктов реакции (обзор). Журнал прикладной химии, 95(2), 164–230.
- [11] Афанасьева, М. А., Шуршина, А. С., & Кулиш, Е. И. (2024). Вискозиметрическое исследования разбавленных растворов пектина в присутствии ионов поливалентных металлов. Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом института фармации, химии и биологии НИУ «БелГУ», 173.
- [12] Пономаренко, С. А., & Лонский, С. Л. (2026). Исследование стойкости термопластичного полиуретана при термоокислительной и термохимической обработке в среде диэтиленгликоля методами гель-проникающей хроматографии и микроструктурного анализа. Труды ВИАМ, 1(155), 67–84.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Shodiyev, A. F., Mukhiddinov, B. F., Jo'rayev, S. T., & Shokirov, R. Q. (2026). 4,4'-Metilendifenildiizosiyanat asosidagi poliuretanlarning qovushqoqlik xossalari va makromolekulyar tavsiflarini viskozimetrik usulda tadqiq etish. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.39>

UO‘K: 661.728.7:620.3:678.5

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.40

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**MAHALLIY XOMASHYOLAR ASOSIDA SELLYULOZA
NANOKRISTALLARI SINTEZI VA ULAR ASOSIDA YUQORI SAMARALI
ADGEZION KOMPOZITSIYALAR YARATISH ISTIQBOLLARI**



**Tursunboyev Alisher
Qurbonmurod o'g'li**

Qarshi davlat texnika universiteti
assistent-o'qituvchisi, Shahrizabz,
O'zbekiston
E-mail:
alishertursunboyev96@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-3614-0298
Science ID: MQD-0126-0035



**Ochilov Abduraxim
Abdurasulovich**

T.f.d., dotsent, kafedra mudiri,
Buxoro davlat texnika universiteti,
Buxoro, O'zbekiston
E-mail: ochilov82@gmail.ru
ORCID ID: 0009-0006-0725-3245



**Maxmudov Rafiq
Amonovich**

T.f.d., professor, kafedra professori,
Buxoro davlat texnika universiteti,
Buxoro, O'zbekiston
E-mail:
rafiqmaxmudov330@gmail.com
ORCID ID: 0009-0007-0811-2233

Annotatsiya. Ushbu maqolada mahalliy paxta linti asosida sellyuloza nanokristallarini (SNK) kislotali gidroliz usuli yordamida sintez qilish texnologiyasi va ularning fizik-kimyoviy xossalari o'rganilgan. Ishqoriy ishlov berish, oqartirish va sulfat kislotasi yordamida gidroliz jarayonlarining maqbul parametrlari aniqlangan. SEM tahlili sintez qilingan SNKlarning sirt morfologiyasi va agregatlangan kristall tuzilishini aniqlash imkonini berdi. IQ-spektroskopiya natijalarida sellyulozaga xos 3336, 2897, 1643, 1163, 1051 va 897 sm^{-1} dagi yutilish cho'qqilari qayd etilib, sellyulozaning asosiy molekulyar tuzilishi saqlanib qolganligi tasdiqlandi. TGA natijalariga ko'ra, asosiy termik parchalanish 220–380°C oralig'ida sodir bo'lib, maksimal parchalanish harorati 326°C, massa yo'qotilishi 70 % va yakuniy qoldiq miqdori 8 % ni tashkil etdi. Olingan natijalar sintez qilingan SNKlarning yuqori kristallik va termik barqarorlikka ega ekanligini hamda ularni funksional moddalar bilan modifikatsiyalash orqali yuqori mexanik, termik va adgezion xossalarga ega kompozitsion materiallar yaratishda istiqbolli nanoto'ldirgich sifatida qo'llash mumkinligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: sellyuloza nanokristallari (SNK), paxta linti, kislotali gidroliz, sulfat kislotasi, ishqoriy ishlov berish, oqartirish, SEM, IQ-spektroskopiya, TGA, termik barqarorlik, kristallik, nanoto'ldirgich, adgezion kompozitsiyalar, modifikatsiyalash.

Received: 28.07.2026

Accepted: 20.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

**ПЕРСПЕКТИВЫ СИНТЕЗА НАНОКРИСТАЛЛОВ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА
ОСНОВЕ МЕСТНОГО СЫРЬЯ И СОЗДАНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ АДГЕЗИОННЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

**Турсунбоев Алишер
Курбонмурод угли**

Ассистент-преподаватель
Каршинского государственного
технического университета,
Шахрисабз, Узбекистан

**Очилов Абдурахим
Абдурасулович**

Доктор технических наук,
доцент, заведующий кафедрой
Бухарского государственного
технического университета,
Бухара, Узбекистан

**Махмудов Рафик
Амонович**

Доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры
Бухарского государственного
технического университета,
Бухара, Узбекистан

Аннотация. В статье исследована технология синтеза нанокристаллов целлюлозы (НКЦ) из местного хлопкового линта методом кислотного гидролиза и изучены их физико-химические свойства. Определены оптимальные параметры щелочной обработки, отбеливания и гидролиза с использованием серной кислоты. По результатам СЭМ-анализа установлены особенности морфологии поверхности и агрегированной кристаллической структуры синтезированных НКЦ. В ИК-спектрах зарегистрированы характерные полосы поглощения целлюлозы при 3336, 2897, 1643, 1163, 1051 и 897 см⁻¹, что подтверждает сохранение основной молекулярной структуры целлюлозы. Согласно результатам ТГА, основное термическое разложение происходило в интервале 220–380°C, максимальная температура разложения составила 326°C, потеря массы — 70 %, а конечный остаток — 8%. Полученные результаты свидетельствуют о высокой кристалличности и термической стабильности синтезированных НКЦ, а также подтверждают перспективность их применения в качестве нанонаполнителя для создания композиционных материалов с высокими механическими, термическими и адгезионными свойствами после модификации различными функциональными соединениями.

Ключевые слова: нанокристаллы целлюлозы (НКЦ), хлопковый линт, кислотный гидролиз, серная кислота, щелочная обработка, отбеливание, СЭМ, ИК-спектроскопия, ТГА, термическая стабильность, кристалличность, нанонаполнитель, адгезионные композиции, модификация.

PROSPECTS FOR THE SYNTHESIS OF CELLULOSE NANOCRYSTALS BASED ON LOCAL RAW MATERIALS AND THE CREATION OF HIGH- PERFORMANCE ADHESIVE COMPOSITES BASED ON THEM

**Tursunboyev Alisher
Kurbonmurod ugli**

Assistant Lecturer, Karshi State
Technical University, Shahrisabz,
Uzbekistan

**Ochilov Abdurakhim
Abdurasulovich**

Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor, Head of the
Department, Bukhara State
Technical University, Bukhara,
Uzbekistan

**Makhmudov Rafik
Amonovich**

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Department Professor,
Bukhara State Technical University,
Bukhara, Uzbekistan

Abstract. This study investigates the synthesis of cellulose nanocrystals (CNCs) from locally sourced cotton linter using the acid hydrolysis method and evaluates their physicochemical properties. Optimal parameters for alkali treatment, bleaching, and sulfuric acid hydrolysis were determined. SEM analysis revealed the surface morphology and aggregated crystalline structure of the synthesized CNCs. FTIR spectra showed characteristic cellulose absorption bands at 3336, 2897, 1643, 1163, 1051, and 897 cm⁻¹, confirming the preservation of the main molecular structure of cellulose. According to the TGA results, the main thermal degradation occurred within the range of 220–380 °C, with a maximum degradation temperature of 326 °C, a mass loss of 70 %, and a final residue of 8 %. The obtained results demonstrate the high crystallinity and thermal stability of the synthesized CNCs and indicate their potential as promising nanofillers for the development of composite materials with enhanced mechanical, thermal, and adhesive properties after modification with various functional compounds.

Keywords: cellulose nanocrystals (CNCs), cotton linter, acid hydrolysis, sulfuric acid, alkali treatment, bleaching, SEM, FTIR spectroscopy, TGA, thermal stability, crystallinity, nanofiller, adhesive composites, modification.

Kirish. So'nggi yillarda dunyo miqyosida qayta tiklanuvchi tabiiy resurslardan yuqori qo'shimcha qiymatga ega funksional nanomateriallar ishlab chiqarishga bo'lgan ehtiyoj ortib bormoqda [1, 2]. Xususan, lignosellyulozali biomassa asosida olinadigan selluloza nanokristallari yuqori kristallik darajasi, katta solishtirma sirt maydoni, yuqori mexanik mustahkamligi, biologik parchalanishi va ekologik xavfsizligi sababli adgezion materiallar olish uchun istiqbolli xomashyo hisoblanadi. Shuningdek, selluloza nanokristallari polimer kompozitlar, qadoqlash materiallari, bioasosli plastmassalar, tibbiy biomateriallar, membranalar, qoplamalar hamda yuqori samarali adgezion kompozitsiyalar yaratishda samarali nanoto'ldirgich sifatida keng qo'llanilmoqda [3, 4].

O'zbekiston hududida paxta linti, g'oz'a poyasi, bug'doy somoni, qamish va boshqa lignosellyulozali qishloq xo'jaligi chiqindilari katta hajmda hosil bo'ladi. Ushbu xomashyolar tarkibidagi sellulozaning yuqori ulushi ularni selluloza nanokristallari ishlab chiqarish uchun muhim mahalliy xomashyo manbaiga aylantiradi. Biomassa resurslarini chuqur qayta ishlash nafaqat ekologik muammolarni kamaytirishga, balki import o'rnini bosuvchi yuqori texnologik mahsulotlar ishlab chiqarishga ham imkon beradi.

Ko'plab xorijiy tadqiqotchilar selluloza nanokristallarini olishning kislotali gidroliz, fermentativ gidroliz, TEMPO oksidlanishi, mexanik maydalash va kombinatsiyalangan usullarini ishlab chiqqanlar [5]. Habibi va hammualliflari (2010) selluloza nanokristallarining fizik-kimyoviy xossalari hamda polimer kompozitlarda qo'llanilishi bo'yicha fundamental tadqiqotlar olib borganlar [6]. Klemm va hammualliflari (2011) nanotsellyulozaning turlari, tuzilishi va istiqbolli qo'llanilish sohalarini batafsil tahlil qilganlar [7]. Dufresne (2013) esa selluloza nanokristallari asosidagi nanokompozitlarning mexanik xossalari va sanoatda qo'llanilish imkoniyatlarini ilmiy jihatdan asoslagan [8].

Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, selluloza nanokristallari sintezi bo'yicha ko'plab ilmiy ishlar mavjud bo'lishiga qaramay, ularning asosiy qismi yog'och massasi, bakterial selluloza yoki xorijiy xomashyolar asosida olib borilgan. Mahalliy lignosellyulozali xomashyolar, xususan, paxta linti,

g'oz'a poyasi, bug'doy somoni va boshqa qishloq xo'jaligi chiqindilaridan yuqori kristallik darajasiga ega selluloza nanokristallari olish texnologiyalari yetarli darajada o'rganilmagan.

Bundan tashqari, mahalliy xomashyolardan olingan selluloza nanokristallarining morfolo-giyasi, kristallik darajasi va sirt xossalari, shuningdek, ularning yuqori samarali adgezion kompozitsiyalar yaratishdagi imkoniyatlarini kompleks baholash bo'yicha ilmiy tadqiqotlar yetarli darajada olib borilmagan. Bu holat mahalliy xomashyo asosida selluloza nanokristallari olish texnologiyalarini takomillashtirish hamda ularning amaliy qo'llanilishi bo'yicha tadqiqotlar olib borish zarurligini ko'rsatadi.

Ushbu maqolaning maqsadi mahalliy lignosellyulozali xomashyolar asosida selluloza nanokristallarini sintez qilishning zamonaviy usullarini ilmiy tahlil qilish, ularning fizik-kimyoviy xossalari baholash hamda turli funksional modifikatorlar yordamida modifikatsiyalash orqali yuqori samarali adgezion materiallar yaratish istiqbollari ilmiy jihatdan asoslashdan iborat. Mazkur maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar belgilandi: mahalliy lignosellyulozali xomashyolarning selluloza nanokristallari olish uchun xomashyo sifatidagi imkoniyatlarini tahlil qilish; selluloza nanokristallarini sintez qilish usullarini qiyosiy baholash; olingan selluloza nanokristallarining morfolo-giyasi, kristallik darajasi va fizik-kimyoviy xossalari tahlil qilish; selluloza nanokristallarini turli funksional moddalar yordamida modifikatsiyalash usullarini o'rganish; shuningdek, modifikatsiyalangan selluloza nanokristallari asosida yuqori samarali adgezion materiallar yaratish imkoniyatlari va istiqbollari ilmiy jihatdan asoslash.

Materiallar va usullar. Selluloza nanokristallarini kislotali gidroliz usulida sintez qilish: Mahalliy paxta linti tarkibida α -selluloza miqdorining yuqoriligi (95% dan ortiq), lignin va gemitsellyuloza miqdorining esa nisbatan kamligi sababli selluloza nanokristallari (SNK) olish uchun istiqbolli xomashyo ekanligi tadqiqotlar asosida isbotlangan. Selluloza nanokristallarini sintez qilish kislotali gidroliz yordamida sellulozaning amorf qismlarini selektiv parchalash va kristall qismlarini ajratib olish prinsipiga asoslanadi.

Selluloza nanokristallarining fizik-

kimyoviy xossalarni tadqiq qilish usullari: Sintez qilingan selluloza nanokristallarining tuzilishi, morfologiyasi, kristallik darajasi, sirt funksional guruhlari, termik barqarorligi va kolloid xossalarni kompleks baholash uchun rentgen difraksion tahlil, infraqizil spektroskopiya, skanerlovchi elektron mikroskopiya hamda termogravimetrik tahlil usullaridan foydalanildi.

Rentgen difraksion tahlil yordamida kristallik darajasini aniqlash. Selluloza nanokristallarining kristall tuzilishi va kristallik darajasi Shimadzu XRD-6100 rentgen difraktometrida $\text{CuK}\alpha$ nurlanishidan foydalanib, $2\theta = 5-40^\circ$ diapazonida o'rganildi. Tahlil uchun SNK kukuni oldindan bir xil namlik holatiga keltiriladi, maydalanadi va rentgen difraktometrinining namuna tutqichiga tekis qatlam ko'rinishida joylashtiriladi. O'lchash odatda $\text{CuK}\alpha$ nurlanishida, 2θ burchaklarining $5-40^\circ$ yoki $5-50^\circ$ oralig'ida olib boriladi. Skanerlash tezligi va qadam o'lchami qurilmaning imkoniyatlariga qarab tanlanadi. Namuna yuzasining tekis joylashtirilishi difraksion cho'qqilarning siljishi hamda intensivlikdagi xatolarni kamaytiradi. Tabiiy paxta sellulozasi asosan selluloza I kristall modifikatsiyasiga xos bo'lib, uning rentgenogrammasida odatda 2θ ning $14-16^\circ$, $22-23^\circ$ va $34-35^\circ$ sohalarida xarakterli cho'qqilar kuzatiladi. $22-23^\circ$ atrofidagi maksimum selluloza I ning asosiy kristall tekisliklaridan biriga tegishli bo'lib, uning intensivligi kristallik darajasini baholashda qo'llanadi. 18° atrofidagi soha esa nisbatan amorf fazaga xos signal sifatida qabul qilinadi.

Kristallik indeksi ko'pincha Segal usuli bo'yicha hisoblanadi:

$$KRI = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100 \quad (1)$$

Bu yerda: KRI — kristallik indeksi, %; I_{002} — asosiy kristall cho'qqisining maksimal intensivligi; I_{am} — amorf fazaga tegishli minimal intensivlik.

Kislotali gidrolizdan so'ng kristallik indeksining ortishi amorf selluloza fraksiyasi kamayganini ko'rsatadi. Biroq haddan tashqari kuchli gidroliz sharoitlari kristall hududlarning ham parchalanishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli kristallik darajasi nafaqat yuqori bo'lishi, balki mahsulot hosildorligi va termik barqarorligi bilan birgalikda baholanishi lozim.

IQ-infra qizik spektroskopiya yordamida

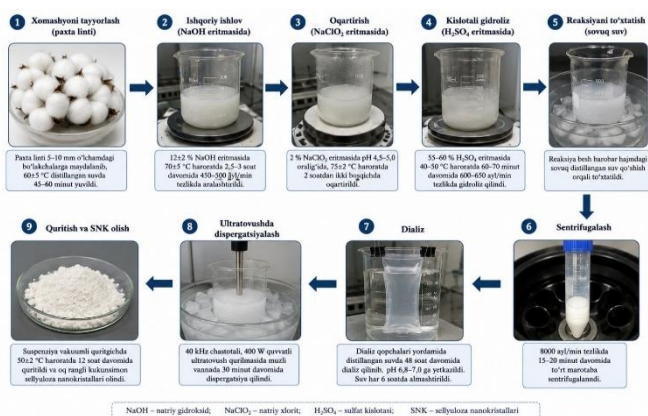
funksional guruhlarni aniqlash. Namunalarning funksional guruhlari Shimadzu spektrometrida $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ diapazonida o'rganildi. IQ usuli selluloza nanokristallarining kimyoviy tuzilishi, sirt funksional guruhlari va tozalash jarayonining samaradorligini aniqlash uchun qo'llanildi. Ushbu tahlil orqali sellulozaga xos gidroksil, C–H, C–O–C va glikozid bog'lari, shuningdek, lignin, gemitsellyuloza yoki sulfat guruhlari qoldiqlari aniqlandi.

SEM yordamida sirt morfologiyasini o'rganish: Namunalarning sirt morfologiyasi va elementar tarkibi JEOL JSM-IT200LA SEM–EDS qurilmasida o'rganildi. Quritilgan namunalar uglerodli lenta ustiga joylashtirilib, vakuum sharoitida elektr o'tkazuvchi yupqa qatlam bilan qoplandi.

Termogravimetrik tahlil yordamida termik barqarorlikni baholash: SNK namunalarining termik barqarorligi NETZSCH STA-409 PG sinxron termik analizatorida azot muhitida o'rganildi. Namunalar xona haroratidan 600°C gacha doimiy isitish tezligida qizdirildi hamda TGA va DTG egri chiziqlari qayd etildi.

Natijalar va ularning muhokamasi: Sintez jarayonining dastlabki bosqichida mahalliy paxta linti $5-10 \text{ mm}$ o'lchamdagi bo'lakchalarga maydalandi hamda tolalar yuzasidagi chang, mum, pektin va boshqa suvda eruvchan aralashmalarni olib tashlash maqsadida $60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ haroratdagi distillangan suvda $45-60$ daqiqa davomida yuvildi. Shundan so'ng namuna $50 \pm 5^\circ\text{C}$ haroratda $5-6$ soat davomida quritilib, keyingi ishlov berish bosqichiga tayyorlandi.

Keyingi bosqichda selluloza tarkibidagi gemitsellyuloza (amorf polisaxarid), pektin va boshqa ishqorda eruvchan komponentlarni ajratish maqsadida namuna $12 \pm 2\%$ li natriy gidroksid (NaOH) eritmasida $70 \pm 5^\circ\text{C}$ haroratda $2,5-3$ soat davomida $450-500 \text{ ayl/min}$ tezlikda aralashtirildi. Oqartirilgan paxta linti tarkibida lignin miqdori juda kam bo'lganligi sababli, $12 \pm 2\%$ li NaOH eritmasi selluloza zanjirlarining parchalanishini kamaytirgan holda xomashyoni samarali tozalash imkonini berdi. Ishqoriy ta'sir tugagach, namuna distillangan suv bilan bir necha marta yuvilib, eritmaning pH qiymati neytral muhitga yetkazildi.



1-rasm. Mahalliy xom ashyodan sellulyoza nanokristallarini kislotali gidroliz usulida sintezi.

Ishqoriy ishlov berilgan sellulyoza oqartirish maqsadida 2% li natriy xlorit (NaClO_2) eritmasida pH 4,5–5,0 oralig'ida, 75°C haroratda 2 soat davomida ikki bosqichda ishlov berildi. Oqartirish jarayonida qolgan lignin qoldiqlari oksidlanib, ajralib chiqdi. Natijada yuqori tozalikdagi oqartirilgan sellulyoza olindi, u distillangan suv bilan yuvilib, neytral muhit hosil bo'lguncha filtrlandi.

Sellyuloza nanokristallarini hosil qilish maqsadida oqartirilgan sellulyoza 55–60% li sulfat kislotasi (H_2SO_4) eritmasida 40–50°C haroratda 60–70 minut davomida, 600–650 ayl/min tezlikda uzluksiz aralashtirish sharoitida gidroliz qilindi. Gidroliz jarayonida sulfat kislotasi sellulyoza makromolekularlarining tartibsiz (amorf) qismlarini parchaladi, yuqori darajada tartiblangan kristall qismlar esa saqlanib qoldi. Kislotasi konsentratsiyasining 55–60% bo'lishi sellulozaning ortiqcha degradatsiyasini kamaytirish bilan birga, yuqori kristallik darajasiga ega nanokristallar hosil bo'lishini ta'minladi.

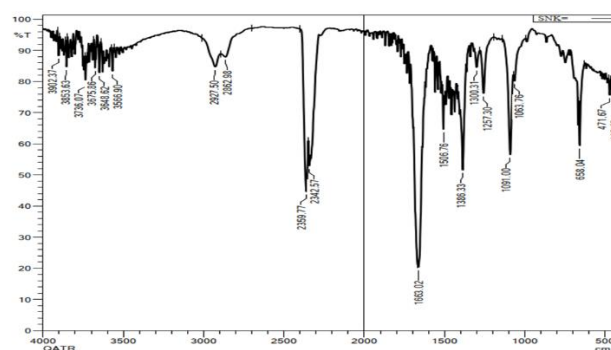
Reaksiya vaqti tugagach, reaksiya aralashmasiga reaksiya hajmidan besh barobar katta hajmdagi sovuq distillangan suv qo'shish orqali jarayon to'xtatildi. Hosil bo'lgan suspenziya 8000 ayl/min tezlikda 15–20 minut davomida to'rt marta sentrifugalanib, sulfat kislotasidan tozalandi. Keyinchalik suspenziya dializ qopchalari yordamida distillangan suvda 48 soat davomida dializ qilinib, pH qiymati 6,8–7,0 oralig'iga yetkazildi. Dializ davomida suv har 6 soatda almashtirib turildi.

Nanokristallarning agregatlanishini kamay-

tirish va bir xil dispers sistema hosil qilish maqsadida suspenziya 40 kHz chastotali, 400 W quvvatli ultratovush qurilmasida 30 minut davomida muzli vannada dispergatsiya qilindi. Shundan so'ng suspenziya vakuumli quritgichda 50°C haroratda 12 soat davomida quritilib, oq rangli, kukunsimon selluloza nanokristallari olindi (1-rasm). Sellyulozaning amorf qismlari selektiv ravishda parchalanib, kristall hududlar saqlanib qolganligi yuqori kristallik darajasiga ega selluloza nanokristallari muvaffaqiyatli sintez qilinganini ko'rsatadi.



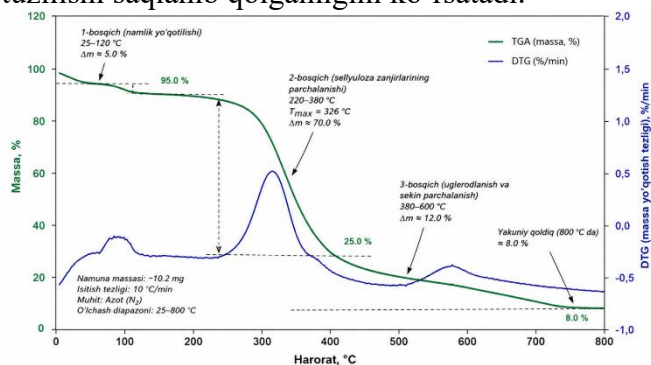
2-rasm. SNKning SEM ko'rinishi.



3-rasm: SNKning IQ spektri.

Sintez qilingan sellulyoza nanokristallarining kimyoviy tuzilishi va funksional guruhlarining infragizil spektroskopiyasi yordamida o'rganilganda (3-rasm), IQ-spektr natijalari selluloza molekulasi xos funksional guruhlarining saqlanib qolganligini hamda kislotali gidroliz jarayonida sellulozaning asosiy kimyoviy skeleti buzilmaganligini ko'rsatdi. Spektorda 3330–3400 cm^{-1} oralig'ida kuzatilgan keng va intensiv yutilish cho'qqilari selluloza molekulalaridagi gidroksil ($-\text{OH}$) guruhlarining valent tebranishlariga tegishli bo'lib, bu guruhlar selluloza zanjirlari orasida vodorod bog'lari mavjudligini ko'rsatadi. 2890–2930 cm^{-1} sohasidagi yutilish cho'qqilari alifatik $\text{C}-\text{H}$ bog'larining valent tebranishlariga mos keladi.

1430–1370 cm^{-1} oralig'idagi cho'qqilar CH_2 va C–H guruhlarining deformatsion tebranishlariga, 1160–1060 cm^{-1} oralig'ida kuzatilgan intensiv cho'qqilar esa β -1,4-glikozid bog'laridagi C–O–C hamda C–O bog'larining tebranishlariga tegishlidir. 897 cm^{-1} atrofidagi yutilish cho'qqisi β -1,4-glikozid bog'lariga xos bo'lib, sellyulozaning molekulyar tuzilishi saqlanib qolganligini ko'rsatadi.



4-rasm. Sintez qilingan sellyuloza nanokristallarining TGA va DTG egri chiziqlari:
1 - adsorbsiyalangan namlikning ajralishi; 2 - sellyuloza zanjirlarining asosiy termik parchalanishi; 3 - uglerodlanish va qoldiq fazaning sekin parchalanishi.

Sintez qilingan sellyuloza nanokristallarining termik barqarorligi TGA/DTG usulida azot muhitida, 25–800°C harorat oralig'ida va 10°C/min isitish tezligida o'rganildi. Tahlil natijalariga ko'ra, nanosellyulozaning termik parchalanishi uchta asosiy bosqichda kechishi aniqlandi.

Birinchi bosqich 25–120°C oralig'ida sodir bo'lib, namuna massasining taxminan 5% ga kamayishi adsorbsiyalangan namlikning bug'lanishi bilan bog'liq bo'ldi. Asosiy termik parchalanish 220–380°C oralig'ida kuzatilib, 326°C da parchalanish tezligining maksimal qiymati (T_{max}) qayd etildi. Ushbu bosqichda massa yo'qotilishi 70% ni tashkil etdi. Mazkur jarayon sellyuloza makromolekularidagi β -1,4-glikozid bog'larining uzilishi, shuningdek, kristall va amorf hududlarning

termik degradatsiyasi bilan bog'liq ekanligi aniqlandi. Uchinchi bosqich 380–600 °C oralig'ida kechib, uglerodlangan qoldiqning sekin parchalanishi natijasida qo'shimcha 12% massa yo'qotildi. 800 °C da yakuniy qoldiq miqdorining 8% ni tashkil etishi sintez qilingan nanosellyulozaning yuqori kristallik darajasi va termik barqarorligini ko'rsatadi.

Xulosa. Mahalliy paxta linti asosida kislotali gidroliz usuli yordamida sellyuloza nanokristallari (SNK) muvaffaqiyatli sintez qilindi. Ishqoriy ishlov berish, oqartirish va kislotali gidroliz bosqichlari uchun maqbul sintez parametrlarining tanlanishi natijasida yuqori tozalik va kristall tuzilishga ega nanosellyuloza olish imkoniyati yaratildi. SEM tahlili sintez qilingan SNKlarning sirt tuzilishini, IQ spektrlari esa sellyulozaga xos funksional guruhlarining saqlanib qolganini hamda sellyuloza bo'lmagan komponentlarning samarali ajratilganini ko'rsatdi. TGA tahlili natijalari sintez qilingan SNKlarning yuqori termik barqarorlikka ega ekanligini tasdiqladi.

Shuningdek, sintez qilingan sellyuloza nanokristallari keyingi bosqichlarda turli funksional modifikatorlar yordamida samarali modifikatsiyalanishi mumkin. Bunday modifikatsiya SNKlarning sirt faolligini oshirish, polimer matritsasi bilan fazalararo bog'lanishni mustahkamlash va disperslanish darajasini yaxshilash imkonini beradi. Bu esa yuqori mexanik, termik va adgezion xossalarga ega yangi avlod adgezion kompozitsiyalarini yaratish uchun ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi. Shunday qilib, sintez qilingan SNKlar ekologik xavfsiz va qayta tiklanuvchi nanoto'l-diruvchi sifatida istiqbolli adgezion materiallarni ishlab chiqishda samarali xomashyo ekanligi ilmiy-amaliy jihatdan aniqlandi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(24), 5438–5466. <https://doi.org/10.1002/anie.201001273>
- [2] Dufresne, A. (2012). Nanocellulose: From nature to high performance tailored materials. Walter de Gruyter GmbH.
- [3] Habibi, Y., Lucia, L. A., & Rojas, O. J. (2010). Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*, 110(6), 3479–3500. <https://doi.org/10.1021/cr900339w>

-
- [4] Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. Chemical Society Reviews, 40(7), 3941–3994. <https://doi.org/10.1039/C0CS00108B>
- [5] Trache, D., Hussin, M. H., Haafiz, M. K. M., & Thakur, V. K. (2017). Recent progress in cellulose nanocrystals: Sources and production. Nanoscale, 9(5), 1763–1786. <https://doi.org/10.1039/C6NR09494E>
- [6] Dufresne, A. (2013). Nanocellulose: A new ageless bionanomaterial. Materials Today, 16(6), 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.06.004>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Tursunboyev, A. Q., Ochilov, A. A., & Maxmudov, R. A. (2026). Mahalliy xomashyolar asosida sellyuloza nanokristallari sintezi va ular asosida yuqori samarali adgezion kompozitsiyalar yaratish istiqbollari. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.40>

UO‘K: 661.728.7:620.3

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.41

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

SELLYULOZA NANOKRISTALLARI VA FUNKSIONAL AKRIL MONOMERLARI O‘RTASIDAGI KIMYOVIY REAKSIYANI TADQIQ ETISH HAMDA ULARNING FIZIK-KIMYOVIY XOSSALARINI O‘RGANISH



**Tursunboyev Alisher
Qurbonmurod o'g'li**

Qarshi davlat texnika universiteti
assistent-o'qituvchisi, Shahrizabz,
O'zbekiston
E-mail:
alishertursunboyev96@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-3614-0298
Science ID: MQD-0126-0035



**Ochilov Abduraxim
Abdurasulovich**

T.f.d., dotsent, kafedra mudiri,
Buxoro davlat texnika universiteti,
Buxoro, O'zbekiston
E-mail: ochilov82@gmail.ru
ORCID ID: 0009-0006-0725-3245



**Maxmudov Rafiq
Amonovich**

T.f.d., professor, kafedra professori,
Buxoro davlat texnika universiteti,
Buxoro, O'zbekiston
E-mail:
rafiqmaxmudov330@gmail.com
ORCID ID: 0009-0007-0811-2233

Annotatsiya. Ushbu tadqiqotda sellyuloza nanokristallari (SNK) va funksional akril monomer — 2-karboksietil akrilat (2KEA) o'rtasidagi kimyoviy reaksiya o'rganilib, hosil bo'lgan mahsulotning morfologik, strukturaviy va termik xususiyatlari kompleks tadqiq qilindi. Reaksiya kaliy persulfat (KPS) inisiatori ishtirokida 60–70 °C haroratda amalga oshirildi. Olingan mahsulotning xossalari skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM), infraqizil spektroskopiya (IQ), termogravimetrik (TGA) va differensial termogravimetrik (DTG) tahlil usullari yordamida baholandi. SEM natijalari reaksiya natijasida sellyuloza nanokristallarining dastlabki tayoqchasimon morfologiyasi o'zgarib, zarrachalar agregatsiyasi va zichroq tuzilma hosil bo'lganini ko'rsatdi. IQ tahlilida 1732, 1545, 2922 va 2853 cm^{-1} sohalaridagi xarakterli yutilish cho'qqilari 2KEA fragmentlarining sellyuloza nanokristallari bilan o'zaro ta'sirlashganini tasdiqladi. DTG natijalariga ko'ra, maksimal termik parchalanish harorati 360 °C dan 385 °C gacha oshgan, TGA natijalarida esa 600 °C dagi qoldiq massa 11,8 % dan 21,2 % gacha ortgan. Olingan natijalar 2KEA bilan funksionallashtirish natijasida sellyuloza nanokristallarining termik barqarorligi va fizik-kimyoviy xususiyatlari yaxshilanganini ko'rsatadi. Sintez qilingan material yuqori samarali adgezion kompozitsiyalar va funksional nanomateriallar yaratish uchun istiqbolli asos sifatida baholandi.

Kalit so'zlar: sellyuloza nanokristallari, 2-karboksietil akrilat, funksional akril monomer, kimyoviy modifikatsiyalash, fizik-kimyoviy xossalari, infraqizil spektroskopiya, SEM, TGA, DTG, termik barqarorlik, morfologiya, funksional guruhlar, kaliy persulfat, adgezion kompozitsiya.

Received: 28.07.2026

Accepted: 20.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ МЕЖДУ НАНОКРИСТАЛЛАМИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ АКРИЛОВЫМИ МОНОМЕРАМИ, А ТАКЖЕ ИЗУЧЕНИЕ ИХ ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

**Турсунбоев Алишер
Курбонмурод угли**

Ассистент-преподаватель
Каришинского государственного
технического университета,
Шахрисабз, Узбекистан

**Очилов Абдурахим
Абдурасулович**

Доктор технических наук,
доцент, заведующий кафедрой
Бухарского государственного
технического университета,
Бухара, Узбекистан

**Махмудов Рафик
Амонович**

Доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры
Бухарского государственного
технического университета,
Бухара, Узбекистан

Аннотация. В работе исследована химическая реакция между нанокристаллами целлюлозы (НКЦ) и функциональным акрилатным мономером — 2-карбоксиэтил акрилатом (2КЭА), а также проведён комплексный анализ морфологических, структурных и термических свойств полученного продукта. Реакцию проводили при температуре 60–70 °С в присутствии инициатора — персульфата калия (KPS). Полученный продукт исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), инфракрасной спектроскопии (ИК), термогравиметрического (ТГА) и дифференциального термогравиметрического (ДТГ) анализа. По данным СЭМ после реакции наблюдалось изменение исходной стержнеобразной морфологии нанокристаллов целлюлозы, сопровождаемое повышением степени агрегации и формированием более плотной структуры. ИК-анализ выявил характерные полосы поглощения при 1732, 1545, 2922 и 2853 см⁻¹, подтверждающие взаимодействие фрагментов 2КЭА с нанокристаллами целлюлозы. Согласно данным ДТГ, максимальная температура термического разложения повысилась с 360 до 385 °С, а по данным ТГА остаточная масса при 600 °С увеличилась с 11,8 до 21,2 %. Полученные результаты свидетельствуют об улучшении термической стабильности и физико-химических свойств модифицированного материала. Синтезированный продукт может рассматриваться как перспективная основа для создания функциональных наноматериалов и высокоэффективных адгезионных композиций.

Ключевые слова: нанокристаллы целлюлозы, 2-карбоксиэтил акрилат, функциональный акрилатный мономер, химическая модификация, физико-химические свойства, ИК-спектроскопия, СЭМ, ТГА, ДТГ, термическая стабильность, морфология, функциональные группы, персульфат калия, адгезионные композиции.

INVESTIGATION OF THE CHEMICAL REACTION BETWEEN CELLULOSE NANOCRYSTALS AND FUNCTIONAL ACRYLIC MONOMERS, AND STUDY OF THEIR PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES

**Tursunboyev Alisher
Kurbonmurod ugli**

Assistant Lecturer, Karshi State
Technical University, Shahrisabz,
Uzbekistan

**Ochilov Abdurakhim
Abdurasulovich**

Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor, Head of the
Department, Bukhara State
Technical University, Bukhara,
Uzbekistan

**Makhmudov Rafik
Amonovich**

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Department Professor,
Bukhara State Technical University,
Bukhara, Uzbekistan

Abstract. This study investigates the chemical reaction between cellulose nanocrystals (CNCs) and the functional acrylate monomer 2-carboxyethyl acrylate (2-CEA), together with a comprehensive evaluation of the morphological, structural, and thermal properties of the resulting product. The reaction was carried out at 60–70 °C in the presence of potassium persulfate (KPS) as an initiator. The obtained product was characterized using scanning electron microscopy (SEM), infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TGA), and differential thermogravimetric analysis (DTG). SEM analysis revealed a change in the initial rod-like morphology of the cellulose nanocrystals, accompanied by increased particle aggregation and the formation of a denser structure. FTIR analysis showed characteristic absorption bands at 1732, 1545, 2922, and 2853 cm⁻¹, confirming the interaction of 2-CEA fragments with the cellulose nanocrystals. According to the DTG results, the maximum thermal

decomposition temperature increased from 360 to 385 °C, while the TGA results showed an increase in residual mass at 600 °C from 11.8% to 21.2%. The results demonstrate improved thermal stability and physicochemical properties of the modified material. The synthesized product can be considered a promising basis for developing functional nanomaterials and high-performance adhesive composites.

Keywords: *cellulose nanocrystals, 2-carboxyethyl acrylate, functional acrylate monomer, chemical modification, physicochemical properties, FTIR spectroscopy, SEM, TGA, DTG, thermal stability, morphology, functional groups, potassium persulfate, adhesive composites.*

Kirish. Hozirgi vaqtda qayta tiklanuvchi biomassa resurslaridan yuqori qo‘shimcha qiymatga ega funksional nanomateriallar olish bo‘yicha tadqiqotlar jadal rivojlanmoqda [1, 2]. Lignosellyulozali xomashyodan olinadigan selluloza nanokristallari (SNK) yuqori kristallik darajasi, katta solishtirma sirt maydoni, past zichligi, biologik mosligi, biologik parchalanuvchanligi va mexanik mustahkamligi bilan ajralib turadi [3, 4]. Ushbu xususiyatlar SNKni polimer kompozitlar, biotibbiyot materiallari, qadoqlash materiallari, elektronika, katalizatorlar hamda funksional qoplamalar yaratishda istiqbolli nanoto‘ldiruvchi sifatida qo‘llash imkonini beradi [5, 6].

Sellyuloza nanokristallarining funksional xususiyatlarini kengaytirish maqsadida ularni turli xil monomerlar bilan kimyoviy modifikatsiyalash bo‘yicha tadqiqotlar olib borilmoqda [7, 8]. Ayniqsa, akrilat monomerlarining tarkibidagi vinil guruhlarining yuqori reaksiya faolligi hamda karboksil va efir guruhlarining mavjudligi SNK sirtida yangi funksional markazlarni shakllantirish imkonini beradi [9]. Bunday modifikatsiya nanokristallarning organik muhitdagi dispersiyalanish xususiyatlarini, polimer matritsalarini bilan o‘zaro ta‘sirini, shuningdek, ularning termik va mexanik ko‘rsatkichlarini yaxshilashga xizmat qilishi mumkin.

Shu bilan birga, mavjud ilmiy tadqiqotlarda asosan tayyor kompozitsion materiallarning xossalarini baholash yoki selluloza nanokristallarini alohida usullar yordamida funksionalashtirish masalalariga e‘tibor qaratilgan. SNK va funksional akril monomerlar o‘rtasida kechadigan kimyoviy jarayonni kompleks tahlil qilish, hosil bo‘lgan mahsulotning fizik-kimyoviy xususiyatlarini zamonaviy instrumental usullar asosida baholash hamda mazkur jarayonni keyingi funkcionallashtirish bosqichlari uchun ilmiy asos sifatida qo‘llash masalalari yetarlicha yoritilmagan.

Bundan tashqari, mahalliy xomashyo asosida olingan selluloza nanokristallari va funksional akril monomerlar ishtirokidagi bunday jarayonlarni tadqiq etish bo‘yicha ma‘lumotlar cheklangan.

Yuqoridagilardan kelib chiqib, ushbu tadqiqotning maqsadi sintez qilingan selluloza nanokristallari va funksional akril monomer — 2-karboksietil akrilat o‘rtasidagi kimyoviy reaksiyani o‘rganish, hosil bo‘lgan mahsulotning fizik-kimyoviy xususiyatlarini aniqlash hamda undan adgezion materiallar va funksional nanomateriallar olish uchun ilmiy asoslarni shakllantirishdan iborat.

Materiallar va usullar.

Materiallar va kimyoviy reaktivlar.

Tadqiqotda foydalanilgan selluloza nanokristallari (SNK) avvalgi tadqiqotlarda paxta linti asosida sulfat kislotali gidroliz usuli yordamida sintez qilingan. Funksional akril monomer sifatida 2-karboksietil akrilat (2-CEA, 98%), erkin radikal reaksiyasini boshlovchi inisiator sifatida kaliy persulfat (KPS) va yuvish jarayonida atseton (99,5%) ishlatildi. Mazkur kimyoviy moddalar ChemSrc (Xitoy) kompaniyasidan xarid qilingan. Tajribalar davomida laboratoriya sharoitida tayyorlangan distillangan suvdan foydalanildi. Barcha reaktivlar analitik tozalik darajasida bo‘lib, tajribadan oldin qo‘shimcha tozalashdan o‘tkazilmadi.

Sellyuloza nanokristallari va funksional akril monomer o‘rtasidagi kimyoviy reaksiya.

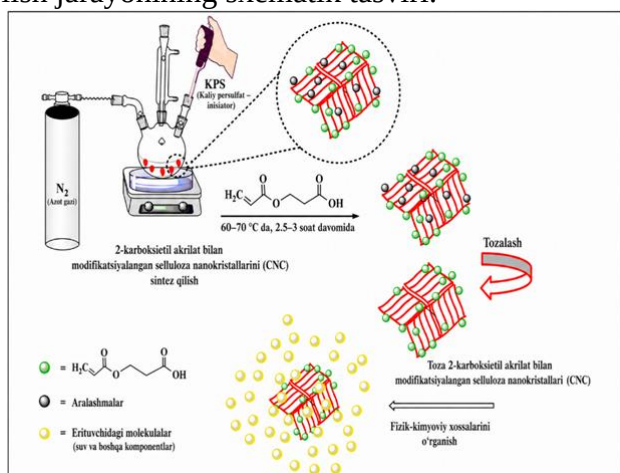
Tajribaning dastlabki bosqichida 1,50 g selluloza nanokristallari 120 ml distillangan suvga solinib, azot atmosferasida 60°C haroratda magnit aralashtirgich yordamida 30–40 daqiqa davomida aralashtirildi. Natijada bir jinsli selluloza nanokristallari dispersiyasi hosil qilindi.

Keyingi bosqichda 0,5% kaliy persulfat (KPS) 50 ml distillangan suvda eritilib, hosil bo‘lgan eritma reaksiya muhitiga asta-sekin qo‘shildi. Aralashma qo‘shimcha ravishda 30–40 daqiqa davomida aralashtirildi. Shundan so‘ng 2,1 ml 2-

karboksietil akrilat reaksiya muhitiga tomchilatib kiritildi.

Reaksiya aralashmasi 60–70°C haroratda 2,5–3 soat davomida uzluksiz aralashtirildi. Ushbu sharoitda selluloza nanokristallari yuzasi va funksional akril monomer oʻrtasida kimyoviy oʻzaro taʼsir jarayoni olib borildi. Tajriba jarayonining umumiy texnologik ketma-ketligi 1-rasmda keltirilgan.

1-rasm. 2-karboksietil akrilat bilan funksionallashtirilgan selluloza nanokristallarini olish jarayonining sxematik tasviri.



1-rasm. 2-karboksietil akrilat bilan funksionallashtirilgan selluloza nanokristallarini sintez qilish, tozalash va fizik-kimyoviy xossalarni oʻrganish jarayonining sxematik tasviri.

Reaksiya mahsulotini ajratish va tozalash.

Reaksiya jarayoni yakunlangach, reaksiya aralashmasi xona haroratigacha sovitildi. Hosil boʻlgan mahsulot 80 ml atseton bilan qayta ishlanib, 4500–5000 ayl/min tezlikda 10–15 daqiqa davomida sentrifugalash orqali ajratildi.

Mahsulotni yuvish va sentrifugalash jarayonlari uch marta takrorlandi. Bunda reaksiya mahsulotida qolishi mumkin boʻlgan polimerlar va boshqa qoʻshimcha komponentlarni imkon qadar toʻliq ajratish koʻzda tutildi. Tozalangan mahsulot 40°C haroratda vakuumli quritgichda 24 soat davomida quritildi.

Quritilgan namuna keyingi fizik-kimyoviy tahlillarni amalga oshirishgacha eksikatorida saqlandi. Sellyuloza nanokristallari va 2-karboksietil akrilat oʻrtasidagi reaksiya jarayonining tenglamasi 2-rasmda keltirilgan.

Fizik-kimyoviy tahlil usullari. Kimyoviy reaksiya natijasida olingan namunalarning tarkibiy va fizik-kimyoviy xususiyatlarini aniqlash uchun bir nechta instrumental tahlil usullaridan foydalanildi. Namunalardagi funksional guruhlarning oʻzgarishi infraqizil spektroskopiya (IQ) usuli yordamida oʻrganildi. Kristall tuzilishida yuz bergan oʻzgarishlar rentgen difraksiyasi (XRD) usuli orqali baholandi. Zarrachalarning morfologiyasi va sirt tuzilishi skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) yordamida tadqiq qilindi. Namunalarning termik barqarorligi va qizdirish jarayonidagi massa oʻzgarishlari esa termogravimetrik tahlil (TGA) usuli asosida aniqlandi.

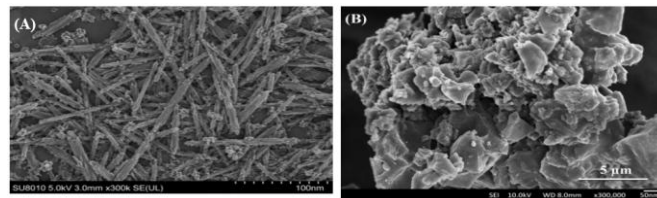
Natijalar va ularning muhokamasi.

Namunalarning morfologik xususiyatlari.

2-rasmda dastlabki selluloza nanokristallari (A) va ularning 2-karboksietil akrilat bilan kimyoviy reaksiyasi natijasida olingan mahsulot (B)ning SEM tasvirlari keltirilgan.

2(A)-rasm tahlili shuni koʻrsatadiki, dastlabki selluloza nanokristallari asosan ingichka tayoqchasimon morfologiyaga ega. Zarrachalar bir-biridan nisbatan yaxshi ajralgan boʻlib, alohida kristallitlar koʻrinishida namoyon boʻladi. Bunday morfologik tuzilma sellulozaning kislotali gidrolizi jarayonida amorf qismlarining parchalanishi, nisbatan tartibli kristall sohalarining esa saqlanib qolishi bilan izohlanadi.

Mazkur morfologiya selluloza nanokristallarining dastlabki holatdagi nisbatan yuqori tartiblangan tuzilishini koʻrsatadi. Keyingi 2(B)-rasm tasviri bilan taqqoslash orqali 2-karboksietil akrilat bilan kimyoviy reaksiyadan soʻng zarrachalar morfologiyasi va ularning oʻzaro joylashishida yuz bergan oʻzgarishlarni baholash mumkin.



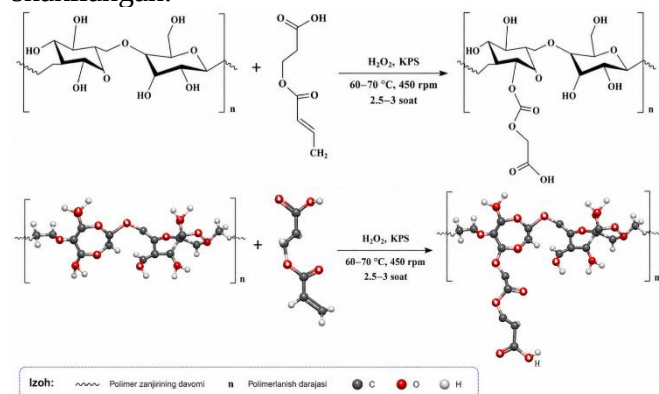
2-rasm. Sellyuloza nanokristallari (A) va 2-karboksietil akrilat bilan reaksiyaga kirishgan selluloza nanokristallarining (B) SEM tasvirlari.

Kimyoviy reaksiya natijasida olingan namunaning SEM tasviri (2(B)-rasm) dastlabki

sellyuloza nanokristallari (SNK) morfologiyasidan sezilarli darajada farq qilishi kuzatildi. Reaksiya mahsulotida alohida tayoqchasimon zarrachalar deyarli kuzatilmaydi. Aksincha, zarrachalarning o'zaro birikishi natijasida zich agregatlar va g'ovaksimon tuzilmalar shakllangan.

Zarrachalar sirtining notekisligi hamda morfologiyasida yuzaga kelgan dag'al o'zgarishlar 2-karboksietil akrilat fragmentlarining sellyuloza nanokristallari yuzasi bilan kimyoviy bog'lanishi natijasida sirt xususiyatlarining o'zgarganligini ko'rsatadi.

Bundan tashqari, reaksiya jarayonida hosil bo'lgan yangi funksional guruhlar nanokristallar orasidagi molekulalararo o'zaro ta'sirlarni kuchaytirishi natijasida zarrachalarning agregatsiya darajasi ortganligi kuzatiladi. Natijada dastlabki SNK uchun xos bo'lgan nisbatan alohida va tayoqchasimon morfologiya o'rniga o'zaro birikkan, zichroq va g'ovaksimon struktura shakllangan.



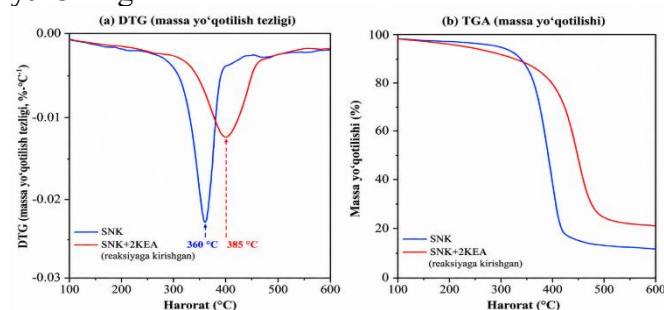
Sellyuloza nanokristallari (SNK) hamda 2-karboksietil akrilat bilan kimyoviy reaksiya natijasida olingan SNK-MA namunasining termik barqarorligi differensial termogravimetrik (DTG) va termogravimetrik (TGA) tahlil usullari yordamida baholandi (3-rasm).

DTG tahlili natijalari (4(a)-rasm) dastlabki SNK namunasida maksimal massa yo'qotilish tezligi 360°C haroratda kuzatilganini ko'rsatdi. Kimyoviy modifikatsiyadan so'ng olingan SNK-MA namunasida esa mazkur ko'rsatkich 385°C ga siljigan. Demak, kimyoviy reaksiya natijasida maksimal termik parchalanish harorati 25°C ga

oshgan.

DTG egri chizig'ining minimum qiymati dastlabki SNK namunasida taxminan $-0,023\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, SNK-MA namunasida esa $-0,012\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ni tashkil etdi. Ushbu qiymatlar taqqoslanganda, massa yo'qotilish tezligi qariyb 1,9 marta kamaygani aniqlandi. Bu holat SNK-MA namunasida termik parchalanish jarayoni nisbatan sekinlashganini hamda kimyoviy modifikatsiyadan keyin materialning issiqlik ta'siriga chidamliligi oshganini ko'rsatadi.

Umuman olganda, DTG tahlili natijalari 2-karboksietil akrilat bilan kimyoviy modifikatsiyalash SNKning termik barqarorligini yaxshilaganini ko'rsatadi.



4-rasm. Sellyuloza nanokristallari (SNK) hamda 2-karboksietil akrilat bilan kimyoviy reaksiya natijasida olingan mahsulotning termik parchalanish xususiyatlari:
(a) DTG va (b) TGA egri chiziqlari.

TGA tahlili natijalari (4(b)-rasm) ham kimyoviy reaksiya natijasida olingan mahsulotning termik barqarorligi oshganligini ko'rsatdi. Dastlabki SNK namunasida asosiy massa yo'qotilishi 330–420°C harorat oralig'ida sodir bo'lgan bo'lsa, SNK-2KEA namunasida ushbu jarayon 360–470 °C oralig'iga siljigan. Bu holat modifikatsiyalangan namunada termik parchalanish jarayoni dastlabki namunaga nisbatan taxminan 40–50 °C yuqoriroq haroratlarda kechganligini ko'rsatadi.

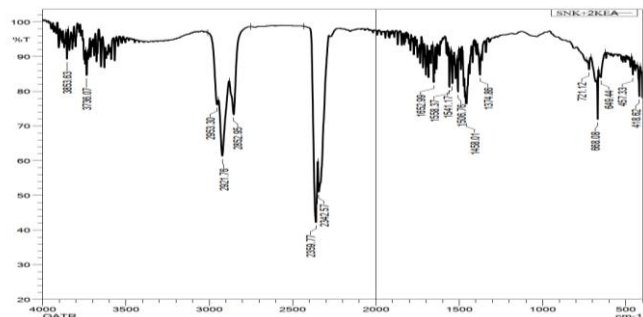
600°C haroratda dastlabki SNK namunasining qoldiq massasi 11,8% ni tashkil etgan bo'lsa, SNK-MA namunasida ushbu ko'rsatkich 21,2% ga yetgan. Natijada qoldiq massa miqdori 9,4 foiz punktga, ya'ni taxminan 1,8 baravar oshgan. Bu ko'rsatkich modifikatsiyalangan materialning yuqori harorat ta'sirida parchalanishga nisbatan barqarorligi ortganligini ko'rsatadi.

DTG va TGA natijalarini birgalikda tahlil qilish shuni ko'rsatadiki, 2-karboksietil akrilatning

sellyuloza nanokristallari bilan kimyoviy o'zaro ta'siri natijasida materialning maksimal termik parchalanish harorati oshgan, massa yo'qotilish tezligi kamaygan va yuqori haroratlarda hosil bo'ladigan qoldiq massa miqdori sezilarli darajada ortgan. Mazkur o'zgarishlar reaksiya natijasida olingan materialning termik barqarorligi yaxshilanganligini tasdiqlaydi.

Infraqizil spektroskopik tahlil. Sellyuloza nanokristallari (SNK) va 2-karboksietil akrilat (2KEA) o'rtasidagi kimyoviy reaksiya natijasida hosil bo'lgan mahsulotning funksional guruhlarini aniqlash maqsadida infraqizil (IQ) spektroskopik tahlil o'tkazildi (5-rasm).

Olingan spektrda 3428 sm^{-1} sohada kuzatilgan keng yutilish cho'qqisi sellyuloza molekularidagi gidroksil ($-\text{OH}$) guruhlarining vodorod bog'lari bilan bog'liq valent tebranishlariga mos keladi. Ushbu yutilish zonasining saqlanib qolishi sellyuloza nanokristallarining asosiy tuzilishi kimyoviy reaksiyadan keyin ham saqlanganligini ko'rsatadi.



5-rasm. Sellyuloza nanokristallari (SNK) va 2-karboksietil akrilat (2KEA) o'rtasidagi kimyoviy reaksiya natijasida olingan mahsulotning infraqizil (IQ) spektri.

IQ spektrida 2922 sm^{-1} va 2853 sm^{-1} sohalarida kuzatilgan yutilish cho'qqilari alifatik $-\text{CH}_2$ va $-\text{CH}_3$ guruhlarining mos ravishda asimmetrik va simmetrik valent tebranishlariga tegishli. Mazkur yutilishlarning mavjudligi 2-karboksietil akrilat tarkibidagi uglevodorod fragmentlarining reaksiya mahsuloti tarkibiga kirganligini ko'rsatadi.

1732 sm^{-1} atrofida kuzatilgan kuchli yutilish cho'qqisi esa karbonil $\text{C}=\text{O}$ guruhining valent tebranishiga mos keladi. Ushbu yutilish 2-karboksietil akrilat fragmentlarining sellyuloza nanokristallari bilan kimyoviy o'zaro ta'sirini

ko'rsatuvchi muhim spektral belgilardan biri hisoblanadi.

Bundan tashqari, 1545 sm^{-1} dagi yutilish cho'qqisi karboksilat ($-\text{COO}^-$) guruhining asimmetrik valent tebranishiga mos keladi. 1454 sm^{-1} va 1375 sm^{-1} sohalaridagi cho'qqilar alifatik $-\text{CH}_2$ hamda sellyuloza skeletidagi $\text{C}-\text{H}$ guruhlarining deformatsion tebranishlari bilan bog'liq. 1160 sm^{-1} dagi intensiv yutilish murakkab efir bog'idagi $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ guruhining valent tebranishiga, 1030 sm^{-1} dagi cho'qqi esa sellyuloza skeletidagi $\text{C}-\text{O}$ va $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ bog'larining valent tebranishlariga mos keladi.

898 sm^{-1} da kuzatilgan yutilish sellyulozaga xos $\beta-(1\rightarrow4)$ -glikozid bog'ining $\text{C}-\text{H}$ deformatsion tebranishi bilan bog'liq. 721 sm^{-1} va 668 sm^{-1} atrofida yutilishlar uzun alifatik zanjirlardagi $-\text{CH}_2$ guruhlarining deformatsion tebranishlariga, 458 sm^{-1} dagi cho'qqi esa $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ bog'ining deformatsion tebranishlariga mos keladi.

Xulosa. Ushbu tadqiqotda sellyuloza nanokristallari (SNK) va funksional akril monomer — 2-karboksietil akrilat (2KEA) o'rtasidagi kimyoviy reaksiya amalga oshirildi hamda hosil bo'lgan mahsulotning fizik-kimyoviy xususiyatlari kompleks ravishda tadqiq etildi. Reaksiya sxemasi asosida 2-karboksietil akrilatning sellyuloza nanokristallari yuzasidagi faol markazlar bilan o'zaro ta'sirlashuvi natijasida yangi funksional tuzilma hosil bo'lishi aniqlandi.

SEM tahlili natijalari dastlabki sellyuloza nanokristallariga xos tayoqchasimon morfologiyaning kimyoviy reaksiyadan so'ng sezilarli darajada o'zgarganligini ko'rsatdi. Reaksiya mahsulotida zarrachalarning o'zaro birikishi va agregatsiya darajasining ortishi natijasida zichroq hamda g'ovaksimon mikrostrukturaviy tuzilma shakllangan.

IQ-spektroskopik tahlil natijalari reaksiya mahsulotida 2-karboksietil akrilat bilan bog'liq funksional guruhlarining mavjudligini ko'rsatdi. Xususan, 1732 sm^{-1} sohasidagi karbonil guruhiga tegishli yutilish, shuningdek, boshqa xarakterli yutilish cho'qqilari modifikatsiyalangan materialning funksional tarkibiy xususiyatlarini tasdiqladi.

TGA va DTG tahlillari esa kimyoviy modifikatsiyadan keyin materialning termik barqarorligi yaxshilanganligini ko'rsatdi. Maksimal

termik parchalanish haroratining 360°C dan 385°C gacha, ya'ni 25°C ga oshishi, massa yo'qotilish tezligining taxminan 1,9 marta kamayishi hamda 600°C dagi qoldiq massaning 11,8% dan 21,2% gacha ortishi ushbu xulosani tasdiqlaydi.

Umuman olganda, olingan natijalar selluloza nanokristallari va 2-karboksietil akrilat o'rtasidagi kimyoviy o'zaro ta'sir natijasida morfologik,

funksional va termik xususiyatlari o'zgargan yangi material hosil bo'lganligini ko'rsatadi. Mazkur mahsulot keyingi bosqichlarda silanli birikmalar yordamida modifikatsiyalash hamda yuqori samarali adgezion kompozitsiyalar olish uchun istiqbolli funksional nanomaterial sifatida foydalanilishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Ali, A., Aziz, T., Zheng, J., Hong, F., Awad, M. F., Manan, S., Haq, F., Ullah, A., Shah, M. N., Javed, Q., Kubar, A. A., & Guo, L. (2022). Modification of cellulose nanocrystals with 2-carboxyethyl acrylate in the presence of epoxy resin for enhancing its adhesive properties. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 797672. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.797672>
- [2] Habibi, Y., Lucia, L. A., & Rojas, O. J. (2010). Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*, 110(6), 3479–3500. <https://doi.org/10.1021/cr900339w>
- [3] Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3941–3994. <https://doi.org/10.1039/C0CS00108B>
- [4] Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(24), 5438–5466. <https://doi.org/10.1002/anie.201001273>
- [5] Trache, D., Hussin, M. H., Haafiz, M. K. M., & Thakur, V. K. (2017). Recent progress in cellulose nanocrystals: Sources and production. *Nanoscale*, 9(5), 1763–1786. <https://doi.org/10.1039/C6NR09494E>
- [6] Wang, N., Ding, E., & Cheng, R. (2007). Surface modification of cellulose nanocrystals. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 1(3), 228–232. <https://doi.org/10.1007/s11705-007-0041-5>
- [7] Khoshkholgh, M. J., et al. (2020). Acrylic functionalization of cellulose nanocrystals with 2-isocyanatoethyl methacrylate and formation of composites with poly(methyl methacrylate). *ACS Omega*, 5(48), 31092–31100. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04246>
- [8] Lim, D., Baek, M.-J., Kim, H.-S., Baig, C., & Lee, D. W. (2022). Carboxyethyl acrylate incorporated optically clear adhesives with outstanding adhesion strength and immediate strain recoverability for stretchable electronics. *Chemical Engineering Journal*, 437, 135390. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135390>
- [9] Plasma surface-modification of cellulose nanocrystals: A green alternative towards mechanical reinforcement of ABS. (2019). *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/C9RA02451D>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Tursunboyev, A. Q., Ochilov, A. A., & Maxmudov, R. A. (2026). Sellyuloza nanokristallari va funksional akril monomerlari o'rtasidagi kimyoviy reaksiyani tadqiq etish hamda ularning fizik-kimyoviy xossalarini o'rganish. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.41>

UO'K: 621.311.21

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.22

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

IRRIGATSIYA KANALLARIDA MIKROGES ENERGIYA ISHLAB CHIQRISHINI GIDROLOGIK STATISTIKA VA OPTIMALLASHTIRISH MODELI ASOSIDA BAHOLASH



Urishev Boboraim

Texnika fanlari doktori, professor,
Qarshi davlat texnika universiteti,
Qarshi, O'zbekiston
E-mail: bob-urishhev@mail.ru
ORCID ID: 0009-0004-6546-8226
Science ID: DQD-0525-0043



**Quvatov Ulug'bek
Jalolovich**

Texnika fanlari bo'yicha falsafa
doktori (PhD), Qarshi davlat
texnika universiteti, Qarshi,
O'zbekiston
E-mail: u.quvatov@gmail.com
ORCID ID: 0009-0002-3138-963X
Science ID: FQD-0525-0005



**Ochilov Obid Boymurod
o'g'li**

Tadqiqotchi, Qarshi davlat texnika
universiteti, Qarshi, O'zbekiston
E-mail: obidbekochilov@bk.ru
ORCID ID: 0000-0002-1172-4747
Science ID: MQD-0625-0018



**Qulmatov Sanjar
Xolmumin o'g'li**

Tadqiqotchi, Qarshi davlat texnika
universiteti, Qarshi, O'zbekiston
E-mail: sanjarqulmatov0327@gmail.com
ORCID ID: 0009-0004-9748-6103
Science ID: MQD-0825-0060

Annotatsiya. Maqolada irrigatsiya kanallari va gidrotexnik inshootlarda mavjud suv oqimi energetik potensialidan mikroGESlar yordamida foydalanishni suv resurslarini boshqarish nuqtai nazaridan optimallashtirish masalalari tadqiq etilgan. R-10 kanalining 2016–2025-yillardagi gidrologik ma'lumotlari Pirson III tipidagi taqsimot yordamida statistik qayta ishlangan, variatsiya va asimmetriya koeffitsiyentlari hamda turli ta'minlanganlik darajalariga mos hisobiy suv sarflari aniqlangan. Sug'orish talabini ustuvor cheklov sifatida saqlagan holda gidroenergetik potensialdan foydalanishni maksimumlashtirishga qaratilgan optimallashtirish modeli ishlab chiqilgan. Suv sarfi, napor va quvvat balanslariga asoslangan mikroGES matematik modeli taklif etilgan, u energiya ishlab chiqarishni vaqt bo'yicha o'zgaruvchan gidrologik sharoitlarda prognozlash imkonini beradi.

Kalit so'zlar: mikroGES, gidrotexnik inshoot, irrigatsiya kanali, suv sarfi, Pirson III taqsimoti, ta'minlanganlik, optimallashtirish, suv-energiya balansi.

Received: 28.08.2026

Accepted: 05.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ОЦЕНКА ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МИКРОГЭС В ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ И МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ

Уришев Бобораим

Доктор технических наук,
профессор, Каршинский
государственный технический
университет, Карши,
Узбекистан

**Куватов Улугбек
Жалолович**

Доктор философии по
техническим наукам (PhD),
Каршинский государственный
технический университет,
Карши, Узбекистан

**Очилов Обид Боймурод
угли**

Исследователь, Каршинский
государственный технический
университет, Карши,
Узбекистан

**Кулматов Санжар
Холмумин угли**

Исследователь, Каршинский
государственный технический
университет, Карши,
Узбекистан

Аннотация. В статье исследованы вопросы оптимизированного использования энергетического потенциала водного потока в оросительных каналах и гидротехнических сооружениях посредством микроГЭС с точки зрения управления водными ресурсами. Для статистической обработки гидрологических данных канала Р-10 за 2016–2025 гг. использовано распределение Пирсона III типа, определены коэффициенты вариации и асимметрии, а также расчётные расходы воды при различных уровнях обеспеченности. Разработана математическая модель оптимизации, максимизирующая выработку электроэнергии при сохранении приоритетного водообеспечения ирригационной системы. Предложена математическая модель на основе балансов расхода воды, напора и мощности, позволяющая прогнозировать выработку энергии в изменяющихся гидрологических условиях.

Ключевые слова: микроГЭС, гидротехническое сооружение, оросительный канал, расход воды, распределение Пирсона III, обеспеченность, оптимизация, водно-энергетический баланс.

ASSESSING MICRO HYDROPOWER GENERATION IN IRRIGATION CANALS BASED ON HYDROLOGICAL STATISTICS AND AN OPTIMIZATION MODEL

Urishev Boboraim

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Karshi State Technical
University, Karshi, Uzbekistan

**Quvatov Ulugbek
Jalolovich**

Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Karshi State
Technical University, Karshi,
Uzbekistan

**Ochilov Obid Boymurod
ugli**

Researcher, Karshi State Technical
University, Karshi, Uzbekistan

**Qulmatov Sanjar
Xolmumin ugli**

Researcher, Karshi State Technical
University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. The paper investigates the optimized utilization of hydropower potential available at irrigation canals and hydraulic structures by means of micro hydropower plants, from a water-resource management perspective. Pearson Type III distribution is applied to process the hydrological observations of the R-10 irrigation canal for 2016–2025, yielding the variation and skewness coefficients and the design water discharges for various levels of assurance. An optimization model is developed to maximize electricity generation while maintaining the required irrigation water supply as a priority constraint. A mathematical model based on water discharge, hydraulic head and power balances is proposed, enabling forecasting of energy generation under time-varying hydrological conditions.

Keywords: micro hydropower plant, hydraulic structure, irrigation canal, water discharge, Pearson Type III, assurance level, optimization, water-energy balance.

Kirish. Sugʻorish tizimlaridagi gidrotexnik inshootlar asosan suvni isteʼmolchilarga belgilangan miqdorda yetkazish, suv sathini boshqarish va oqimni taqsimlash vazifalarini bajaradi. Biroq bunday inshootlarning yuqori va pastki byeflari orasida shakllanadigan sathlar farqi maʼlum gidroenergetik potensialni yuzaga keltiradi [1, 2]. Ushbu potensialdan mikroGESlar yordamida foydalanish irrigatsiya tizimining asosiy funksiyasiga taʼsir qilmagan holda qoʻshimcha elektr energiyasi ishlab chiqarish imkonini beradi [3, 4].

Irrigatsiya kanallari hamda ulardagi suv taqsimlash, dimlash va suv tashlash inshootlari uchun naporning odatda 1,5–6,0 m diapazonda boʻlishi va suv sarfining mavsum davomida

oʻzgarishi xarakterlidir. Shu sababli mikroGES uchun energiya ishlab chiqarishni baholashda koʻp yillik gidrologik maʼlumotlarning statistik xarakteristiklari va suv sarfining taʼminlanganlik darajasi hisobga olinishi zarur.

Tadqiqotning maqsadi irrigatsiya kanalidagi koʻp yillik gidrologik rejimni statistik baholash, hisobiy va kafolatlangan suv sarflarini aniqlash hamda sugʻorish talabini ustuvor cheklov sifatida saqlagan holda mikroGES energiya ishlab chiqarishini suv sarfi–napor–quvvat balanslari asosida optimallashtirish va prognozlashdan iborat.

Tadqiqot usullari. R-10 kanalining gidrologik rejimini statistik baholash. MikroGESning yillik energiya ishlab chiqarishini

ishonchli aniqlash uchun R-10 kanalining 2016–2025-yillardagi ko‘p yillik gidrologik kuzatuv ma’lumotlari statistik qayta ishlandi. Hisobiy suv sarflarining ta’minlanganligini aniqlashda Pirson III tipidagi taqsimot qabul qilindi [5, 6]. λ masshtab parametri sifatida qabul qilinganda taqsimotning ehtimollik zichligi:

$$f(x) = \frac{(x-x_0)^{\alpha-1} \exp[-(x-x_0)/\lambda]}{\Gamma(\alpha)\lambda^\alpha}, \quad x > x_0 \quad (1)$$

bu yerda x_0 – taqsimotning quyi chegarasi; λ – masshtab parametri; α – shakl parametri; $\Gamma(\alpha)$ – Eyler gamma-funksiyasi.

Ko‘p yillik qatordagi har bir qiymat uchun modul koeffitsiyenti $K_{Ri} = Q_i/\bar{Q}$ aniqlanadi. Variatsiya koeffitsiyenti:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{Ri}-1)^2}{n-1}} \quad (2)$$

Taqsimotning nosimmetrikligini tavsiflovchi asimmetriya koeffitsiyenti:

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (K_{Ri}-1)^3}{(n-1)(n-2)C_v^3} \quad (3)$$

Suv sarfi qatorining o‘rta kvadratik og‘ishi:

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}} \quad (4)$$

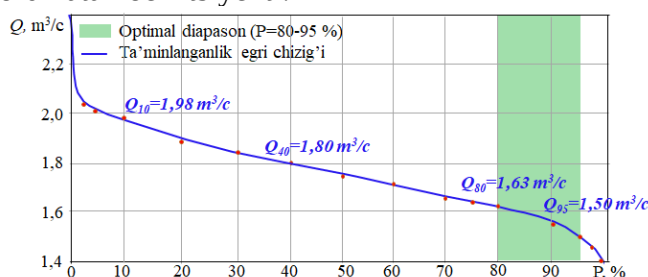
Berilgan P ta’minlanganlikdagi hisobiy suv sarfi:

$$Q_P = \bar{Q} K_P \quad (5)$$

Pirson III taqsimoti uchun modul koeffitsiyenti:

$$K_P = 1 + \psi_P C_v \quad (6)$$

bu yerda ψ_P – berilgan P ta’minlanganlik va C_s asimmetriya koeffitsiyentiga mos ravishda maxsus Pirson III jadvallaridan aniqlanadigan ordinata koeffitsiyenti.



1-rasm. R-10 kanali suv sarfining Pirson III taqsimoti bo‘yicha ta’minlanganlik egri chizig‘i.

Empirik ta’minlanganlik Chegodayev formulasi yordamida hisoblandi [7, 8]:

$$P = \frac{m-0.3}{n+0.4} \cdot 100\% \quad (7)$$

bu yerda m – kamayish tartibida

joylashtirilgan qator elementining tartib raqami; n – kuzatuvlar soni. Hosil qilingan ta’minlanganlik egri chizig‘i mikroGES uchun o‘rtacha, hisobiy va kafolatlangan suv sarflariga mos energiya ishlab chiqarish miqdorlarini baholash imkonini beradi.

Irrigatsiya va energiya ishlab chiqarishni birgalikda optimallashtirish. MikroGES irrigatsiya tizimiga integratsiya qilinganda suvni sug‘orish uchun yetkazib berish asosiy ustuvor vazifa bo‘lib qoladi [9, 10]. Shuning uchun optimallashtirish masalasi minimal sug‘orish talabini ta’minlagan holda elektr energiyasi ishlab chiqarishni maksimumlashtirish shaklida qo‘yildi [11, 12]:

$$F = \max \sum_{t=1}^T \rho g Q_{GES}(t) H_{GES}(t) \eta_{GES}(t) \Delta t \quad (8)$$

Mavjud suv energiyasidan foydalanish darajasini baholash uchun [13]:

$$K_{s.en} = \frac{\sum E_{MG}}{E_E} \quad (9)$$

bu yerda $\sum E_{MG}$ – gidrotexnik inshootda mikroGESlar tomonidan ishlab chiqarilgan jami elektr energiyasi; E_E – gidrotexnik inshoot orqali o‘tayotgan suv oqimining hisobiy potensial energiyasi.

Boshqaruv texnologiyasining darajasi (an’anaviy rejalashtirishdan real vaqt avtomatik boshqaruvgacha) mavjud suv energiyasidan foydalanish koeffitsiyenti, $K_{s.en}$ qiymatiga bevosita ta’sir qiladi, biroq bu maqolada bosh e’tibor gidrologik ta’minlanganlik va optimallashtirish modeliga qaratilgan [14]. Qabul qilingan $\eta = 0,78$ umumiy FIK sharoitida $K_{s.en} \approx 0,78$ (ya’ni gidravlik quvvatning taxminan 78%i elektr energiyasiga aylantiriladi), qolgan 22% esa turbina-generator agregatidagi energetik yo‘qo-tishlarga to‘g‘ri keladi.

MikroGESning suv sarfi, napor va quvvat balanslari. MikroGESning real ekspluatatsiya sharoitidagi energiya ishlab chiqarishini aniqlash uchun gidrotexnik inshootdagi suv sarfi, foydali napor va energetik yo‘qotishlar vaqt bo‘yicha birgalikda hisobga olinadi [15]. Turbina orqali o‘tayotgan suv sarfi:

$$Q_{GES}(t) = Q_{k1}(t) - Q_s(t) - Q_{b2}(t) - Q_{f2}(t) - Q_d(t) \quad (10)$$

Foydali naporni hisoblashda yuqori va pastki byef suv sathlari farqi hamda panjara, zatvor, suv berish moslamasi va suv olib ketish qismlaridagi gidravlik yo‘qotishlar hisobga olinadi:

$$H_{GES}(t) = (ZYB(t) - ZPB(t)) - \Sigma \Delta H_i(t) \quad (11)$$

bu yerda $ZYB(t)$ va $ZPB(t)$ – mos ravishda yuqori va pastki byeflarning vaqt bo'yicha suv sathi belgisi; $\Sigma \Delta H_i(t)$ – gidravlik yo'qotishlar yig'indisi.

MikroGES kirishidagi mavjud gidravlik quvvat:

$$N_{gid}(t) = \rho g Q_{GES}(t) H_{GES}(t) \quad (12)$$

Agar Q m³/s, H metrda va $\rho \approx 1000$ kg/m³ deb olinsa, gidravlik quvvatni kW da $N_{gid}(t) = 9,81 \cdot Q_{GES}(t) \cdot H_{GES}(t)$ ko'rinishida hisoblash mumkin. Generator chiqishidagi elektr quvvat:

$$N_{el}(t) = \rho g Q_{GES}(t) H_{GES}(t) \eta_T(t) \eta_G(t) \quad (13)$$

Hisobiy davrdagi elektr energiyasi:

$$E_{el} = \int_0^T N_{el}(t) dt \quad (14)$$

Mazkur model suv sarfi, napor, turbina va generator FIKlarining vaqt bo'yicha o'zgarishini hisobga olgani sababli mikroGESning sutkalik, mavsumiy va yillik energiya ishlab chiqarishini nominal quvvatga asoslangan statik yondashuvga nisbatan aniqroq baholash imkonini beradi.

Natijalar va ularning muhokamasi. R-10 kanalining 2016–2025-yillardagi kuzatuv ma'lumotlarini statistik qayta ishlash natijasida quyidagi asosiy gidrologik ko'rsatkichlar aniqlandi (1-jadval).

1-jadval

R-10 kanalining asosiy gidrologik statistik ko'rsatkichlari (2016–2025)

Ko'rsatkich	Birlik	2016–2020 yillar	2021–2025 yillar	O'rtacha (10 yil)
Yillik o'rtacha suv sarfi, Q_{yil}	m ³ /s	1,703	1,831	1,767
Yillik maksimal suv sarfi, Q_{maks}	m ³ /s	4,793	4,781	4,787
Yillik minimal suv sarfi, Q_{min}	m ³ /s	0,118	0,120	0,119
Standart og'ish, σ_Q	m ³ /s	1,216	1,175	1,195
Variatsiya koeffitsiyenti, C_v	–	0,038	0,119	0,094
Asimmetriya koeffitsiyenti, C_s	–	–0,88	0,61	1,45
Energetik faol kunlar soni	kun/yil	287	263	275
Sug'orish mavsumi davomiyligi	oy	10	11	10,5

Pirson III taqsimoti asosida qurilgan ta'minlanganlik egri chizig'idan olingan hisobiy suv

sarflari 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval

Turli ta'minlanganlik darajalariga (P , %) mos hisobiy suv sarflari (Pirson III taqsimoti)

P , %	1	5	10	25	50	75	90	95	99
K_p	1,231	1,159	1,122	1,062	0,997	0,935	0,882	0,851	0,795
Q_p , m ³ /s	2,176	2,049	1,984	1,877	1,763	1,653	1,559	1,504	1,405

R-10 kanalining 2016–2025-yillardagi ko'p yillik gidrologik ma'lumotlarini Pirson III taqsimoti asosida qayta ishlash suv sarfi qatorining variatsiya ($C-v$) va asimmetriya ($C-s$) koeffitsiyentlarini, shu asosda esa turli ta'minlanganlik darajalariga mos hisobiy suv sarflarini aniqlash imkonini berdi. Chegodayev formulasi bo'yicha qurilgan ta'minlanganlik egri chizig'i mikroGES uchun o'rtacha, hisobiy va kafolatlangan suv sarflariga mos energiya ishlab chiqarish miqdorlarini baholashga asos bo'ldi.

Sug'orish talabini ustuvor cheklov sifatida saqlagan holda elektr energiyasi ishlab chiqarishni maksimumlashtirishga qaratilgan optimallashtirish modeli (8)–(9) formulalar orqali ifodalanadi. Model sug'orish uchun ajratiladigan minimal suv sarfini ustuvor cheklov sifatida saqlagan holda, irrigatsiya funksiyasiga zarar yetkazmasdan gidroenergetik potensialdan foydalanish darajasini oshirish imkonini beradi. Amaldagi ko'p yillik oqim rejimida maksimumlashtirilgan maqsad funksiyasi qiymati $F \approx 210\,920$ kWt·soat/yil (o'rtacha 10 yillik davr uchun) ni tashkil etadi.

MikroGESning suv sarfi, napor va quvvat balanslarini (10)–(14) formulalar asosida yagona matematik tizimga birlashtirish gidrotexnik inshootning real ekspluatatsiya rejimida energiya ishlab chiqarishning vaqt bo'yicha o'zgarishini nominal quvvatga asoslangan statik yondashuvga nisbatan aniqroq baholash imkonini beradi. Bu, o'z navbatida, gidrologik ta'minlanganlik darajasi past bo'lgan davrlarda ham optimal suv taqsimotini rejalashtirish uchun zarur bo'ladi. $H = 2,0$ m va $\eta = 0,78$ sharoitida (10)–(14) formulalar bo'yicha hisoblangan o'rtacha 10 yillik quvvat 6,22 kVt (yanvar, minimal) dan 50,57 kVt (iyul, maksimal) gacha o'zgaradi, yillik o'rtacha quvvat esa 23,90 kVt ni, hisobiy davrdagi jami elektr energiyasi E_{el} esa 210 920 kVt·soat/yil ni tashkil etadi.

Xulosa. Ko'p yillik gidrologik ma'lumotlarni Pirson III taqsimoti asosida qayta ishlash mikroGES uchun hisobiy va kafolatlangan suv sarflarini hamda ularga mos energiya ishlab chiqarish miqdorini

aniqlash imkonini beradi.

Sugʻorish talabini ustuvor cheklov sifatida qabul qilgan holda elektr energiyasi ishlab chiqarishni maksimumlashtirishga asoslangan optimallashtirish modeli suv resursidan kompleks foydalanish samaradorligini oshiradi.

Taklif etilgan suv sarfi–napor–quvvat balans modeli mikroGESning oʻzgaruvchan rejimdagi

quvvati va ishlab chiqaradigan elektr energiyasini vaqt boʻyicha hisoblash uchun matematik asos boʻlib xizmat qiladi hamda hisobiy davrlarni kengroq qamrab olishga imkon beradi.

FODALANILGAN ADABIYOTLAR ROʻYXATI

- [1] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), & International Center on Small Hydro Power (ICSHP). (2022). World Small Hydropower Development Report 2022. Vienna; Hangzhou.
- [2] Azimov, U., & Avezova, N. (2022). Sustainable small-scale hydropower solutions in Central Asian countries for local and cross-border energy/water supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112726. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112726>
- [3] World Bank. (2025, June 25). Uzbekistan to enhance energy production through hydropower with World Bank support [Press release].
- [4] Urishev, B., Ochilov, O. O., & Quvatov, U. J. (2026). Sugʻorish kanallarida past naporli mikrogidroelektrostansiyalarni loyihalash: Gidravlik-energetik hisoblar va texnik-iqtisodiy asoslash. *Development of Science*, (6), 119–130.
- [5] Interagency Advisory Committee on Water Data. (1967). Bulletin 15: A uniform technique for determining flood flow frequencies. Hydrology Committee, Water Resources Council.
- [6] Interagency Advisory Committee on Water Data. (1982). Guidelines for determining flood flow frequency (Bulletin 17B). U.S. Geological Survey.
- [7] England, J. F., Cohn, T. A., Faber, B. A., Stedinger, J. R., Thomas, W. O., Veilleux, A. G., Kiang, J. E., & Mason, R. R. (2019). Guidelines for determining flood flow frequency—Bulletin 17C (Techniques and Methods 4-B5). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/tm4B5>
- [8] SNiP 2.01.14-83. Opređenje raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik. (1983).
- [9] Adhau, S. P., Moharil, R. M., & Adhau, P. G. (2012). Mini-hydro power generation on existing irrigation projects: Case study of Indian sites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4785–4795. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.066>
- [10] Kamran, M., Asghar, R., Mudassar, M., & Abid, M. I. (2019). Designing and economic aspects of run-of-canal based micro-hydro system on Balloki-Sulaimanki Link Canal-I for remote villages in Punjab, Pakistan. *Renewable Energy*, 141, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.126>
- [11] Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F. J., Ramos, H. M., & López-Jiménez, P. A. (2017). Optimization strategy for improving the energy efficiency of irrigation systems by micro hydropower: Practical application. *Water*, 9(10), 799. <https://doi.org/10.3390/w9100799>
- [12] Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F. J., López-Jiménez, P. A., & Ramos, H. M. (2018). PATs selection towards sustainability in irrigation networks: Simulated annealing as a water management tool. *Renewable Energy*, 116(A), 234–249. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.043>
- [13] Choudhury, S., Parida, A., Pant, R. M., & Chatterjee, S. (2019). GIS augmented computational intelligence technique for rural cluster electrification through prioritized site selection of micro-hydro power generation system. *Renewable Energy*, 142, 487–496. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.125>
- [14] Ochilov, O. O., & Safarova, S. U. (2023). Oʻzbekistonda muqobil energiya manbalari istiqbollari. *Iqtisodiyot va sotsium / Экономика и социум*, (9/112), 203–208.

- [15] Ochilov, O. O. (2024). Zatvordan chiqayotgan suv energiyasidan foydalanish. “Qishloq xo‘jaligi mahsulotlarini ishlab chiqarish samaradorligini oshirishda innovatsion texnika va texnologiyalardan foydalanishning muammolari va istiqbollari” Respublika ilmiy-amaliy anjumani maqolalar va tezislar to‘plami (pp. 256–258).

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Urishev, B., Quvatov, U. J., Ochilov, O. B., & Qulmatov, S. X. (2026). Irrigatsiya kanallarida mikroGES energiya ishlab chiqarishini gidrologik statistika va optimallashtirish modeli asosida baholash. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.22>

YENGIL SANOAT TARMOQLARI
ЛЕГКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ
LIGHT INDUSTRIES

UO‘K: 621.01

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.42

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

TOLA AJRATGICH KOLOSNIGI ALMASHINUVCHI ELEMENTINING
ISHCHI YUZASINI ULTRATOVUSHLI ISHLOV BERISH ORQALI
QATTIQLIGINI OSHIRISH TADQIQOTLARI



Axmedov Xamidulla Abduxoshimovich

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi M.T. O‘razboyev
nomidagi Mexanika va inshootlar seysmik mustahkamligi instituti
yetakchi ilmiy xodimi, texnika fanlari doktori (DSc), Toshkent,
O‘zbekiston

E-mail: hamidullaakhmedov@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-0491-6644



Xaydarova Marjona Xayotovna

Buxoro tumani yerlarni auksionga chiqarish bo‘limi mutaxassisi,
Buxoro, O‘zbekiston

E-mail: khaydarovamarjona96@gmail.com

Annotatsiya. Mazkur maqolada 4DP-130 rusumli arrali tola ajratgich kolosnigining ishchi qismiga o‘rnatiladigan almashinuvchi elementning ishchi yuzasini ultratovushli ishlov berish orqali qattiqligini oshirish masalasi tadqiq etilgan. Element materiali sifatida O‘zbekistonda keng tarqalgan va iqtisodiy jihatdan qulay bo‘lgan Po‘lat 45 tanlangan. 22 kGs chastota, 10–25 mkm amplituda va 200 N statik kuch sharoitlarida ishlov berish rejimlari o‘rganilgan. Tadqiqot natijalariga ko‘ra, $A=20$ mkm, $P=200$ N va $n=2$ o‘tishdan iborat optimal rejimda yuza qattiqligi 210 HV dan 480 HV gacha, ya‘ni 2,3 marta oshgan, qattiqashtirilgan qatlam chuqurligi taxminan 200 mkm ni tashkil etgan. Yuza g‘adir-budurligi Ra 1,25 mkm dan 0,34 mkm gacha, paxta tolasi bilan ishqalanish koeffitsiyenti esa 0,34 dan 0,23 gacha kamaygan. Abrziv yeyilishning 45% ga kamayishi ultratovushli ishlov berishning almashinuvchi elementning xizmat muddatini oshirishdagi samaradorligini ko‘rsatdi. Olingan natijalar paxta tozalash mashinalarining ishchi organlarini mahalliy Po‘lat 45 asosida modernizatsiya qilish uchun amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so‘zlar: tola ajratgich, kolosnik, almashinuvchi element, ultratovushli ishlov berish, yuza qattiqligi, Po‘lat 45, paxta tolasi, ishqalanish koeffitsiyenti, yeyilishga chidamlilik, g‘adir-budurlik, qattiqashtirilgan qatlam, plastik deformatsiya, nanostruktura.

Received: 29.08.2026

Accepted: 22.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТВЁРДОСТИ РАБОЧЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ СМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА КОЛОСНИКА
ВОЛОКНООТДЕЛИТЕЛЯ ПУТЁМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Ахмедов Хамидулла Абдухошимович

Ведущий научный сотрудник Института механики и
сейсмостойкости сооружений имени М.Т. Уразбаева
Академии наук Республики Узбекистан, доктор технических
наук (DSc), Ташкент, Узбекистан

Хайдарова Маржона Хаётовна

Специалист отдела по выставлению земель Бухарского
района на аукцион, Бухара, Узбекистан

Аннотация. В статье исследован вопрос повышения твёрдости рабочей поверхности сменного элемента колосника пильного волокноотделителя 4ДП-130 методом ультразвуковой обработки. В качестве материала сменного элемента выбрана сталь 45, широко распространённая и экономически доступная в Узбекистане. Исследованы режимы обработки при частоте 22 кГц, амплитуде 10–25 мкм и статическом усилии 200 Н. Установлено, что при оптимальном режиме обработки $A = 20$ мкм, $P = 200$ Н и $n = 2$ прохода твёрдость поверхности увеличивается с 210 HV до 480 HV, то есть в 2,3 раза, а глубина упрочнённого слоя составляет около 200 мкм. Шероховатость поверхности Ra снижается с 1,25 до 0,34 мкм, а коэффициент трения с хлопковым волокном — с 0,34 до 0,23. Снижение абразивного износа на 45% подтверждает эффективность ультразвуковой обработки для повышения долговечности сменного элемента. Полученные результаты имеют практическое значение для модернизации рабочих органов хлопкоочистительных машин с использованием стали 45 местного производства.

Ключевые слова: волокноотделитель, колосник, сменный элемент, ультразвуковая обработка, твёрдость поверхности, сталь 45, хлопковое волокно, коэффициент трения, износостойкость, шероховатость, упрочнённый слой, пластическая деформация, наноструктура.

STUDIES ON INCREASING THE HARDNESS OF THE WORKING SURFACE OF THE REPLACEABLE ELEMENT OF A FIBER SEPARATOR GRID BAR BY ULTRASONIC TREATMENT

Akhmedov Khamidulla

Leading Researcher, M.T. Urazbaev Institute of Mechanics and
Seismic Stability of Structures, Academy of Sciences of the
Republic of Uzbekistan, Doctor of Technical Sciences (DSc),
Tashkent, Uzbekistan

Khaydarova Marjona

Specialist, Department for Putting Land Plots of Bukhara District
up for Auction, Bukhara, Uzbekistan

Abstract. This article investigates the improvement of the working-surface hardness of a replaceable insert of the grid bar of a 4DP-130 saw-type cotton fiber separator using ultrasonic treatment. Steel 45, which is widely available and economically advantageous in Uzbekistan, was selected as the insert material. Treatment regimes were investigated at a frequency of 22 kHz, amplitudes of 10–25 μm , and a static force of 200 N. The results showed that under the optimal treatment regime of $A = 20$ μm , $P = 200$ N, and $n = 2$ passes, the surface hardness increased from 210 HV to 480 HV, corresponding to a 2.3-fold increase, while the hardened layer depth reached approximately 200 μm . Surface roughness Ra decreased from 1.25 to 0.34 μm , and the friction coefficient with cotton fiber decreased from 0.34 to 0.23. A 45% reduction in abrasive wear confirms the effectiveness of ultrasonic treatment in improving the service life of the replaceable insert. The obtained results are of practical importance for the modernization of working components of cotton-processing machines using locally available Steel 45.

Keywords: fiber separator, grid bar, replaceable insert, ultrasonic treatment, surface hardness, Steel 45, cotton fiber, friction coefficient, wear resistance, surface roughness, hardened layer, plastic deformation, nanostructure.

Kirish. Paxta tozalash sanoati O'zbekiston iqtisodiyotining strategik tarmoqlaridan biridir. Tolaning sifati va uni ajratib olish samaradorligi ko'p jihatdan arrali tola ajratgich ishchi organlarining texnik holatiga bog'liq. Arrali tola

ajratgichning ishchi kamerasi arralar barabani va kolosniklar (panjara tayoqchalari) to'plamidan tashkil topgan. Aylanuvchi arralarning tishlari kolosniklar orasidagi tirqishlar orqali chigitli paxta g'altagiga kirib, tolani ilib oladi va uni chigitdan

ajratib chiqaradi.

Ishlash jarayonida kolosniklarning ishchi yuzasi chigit, tola va mayda iflosliklar bilan uzluksiz aloqada bo'lib, kuchli abraziv yeyilishga uchraydi. Yeyilish natijasida kolosnik ishchi qirrasining geometriyasi buziladi va tirqish o'lchami o'zgaradi. Bu esa tola chiqishining kamayishiga, tolaning shikastlanishi ortishiga hamda tola ajratgich ish unumdorligining pasayishiga olib keladi. Butun kolosnikni almashtirish iqtisodiy jihatdan qimmatga tushganligi sababli, uning eng ko'p yeyiladigan ishchi qismiga alohida almashinuvchi element (insert) o'rnatish maqsadga muvofiqdir: element yeyilganda, faqat uning o'zi almashtiriladi.

Almashinuvchi elementning samaradorligi ikki asosiy ko'rsatkichga bog'liq: yuza qattiqligi (yeyilishga chidamlilik) va tola bilan ishqalanish xususiyati. Ishqalanish koeffitsiyenti me'yoridan yuqori bo'lsa, tola uzilib, shikastlanadi va quvvat sarfi ortadi; juda past bo'lsa, tolaning ishonchli ilinish darajasi pasayadi. Shu bois ishchi yuzani bir vaqtning o'zida qattiqashtirish va uning ishqalanish xususiyatlarini maqbul qiymatga keltirish talab etiladi.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. So'nggi o'n yillikda metall detallar yuzasining qatlamini mustahkamlashda ultratovushli ishlov berish (xorijiy manbalarda ultrasonic nanocrystal surface modification — UNSM yoki ultrasonic impact treatment — UIT) usuli jadal rivojlanmoqda. Usulning mohiyati 20 kGs atrofidagi chastotada tebranuvchi qattiq qotishmali indentorning yuzaga yuqori chastotali zarbalar berishi natijasida kuchli plastik deformatsiya (severe plastic deformation, SPD) hosil qilishdan iborat.

Cao, Pyoun va Murakami [1] UNSM usulini aynan $S_{45}C$ po'latida (O'zbekistonda qo'llaniladigan Po'lat 45 ning xalqaro ekvivalenti) tadqiq etib, zarba zichligini oshirish (34 000–68 000 zarba/mm²) natijasida nanostrukturali qatlam qalinligi 2 mkm dan 30 mkm gacha ortishini, mikroqattqlik, g'adir-budurlik va siquvchi qoldiq kuchlanish ko'rsatkichlari yaxshilanishini hamda charchoq mustahkamligi 33% gacha oshishini aniqladilar. Muhim jihati shundaki, g'adir-budurlik R_a 1,49 mkm dan 1,0 mkm gacha kamaygan. Bu natijalar tanlangan material — Po'lat 45 — UTIBga yaxshi javob berishini bevosita tasdiqlaydi.

Wu va hammualliflari [2] toblangan va bo'shatilgan $S_{45}C$ po'latida statik kuch (50–70 N) hamda zarba zichligining ta'sirini o'rganib, optimal statik kuch ~50 N ekanini va charchoq mustahkamligi 464 MPa dan ~550 MPa gacha oshishini ko'rsatdilar. Ayni paytda, zarba zichligi haddan tashqari yuqori bo'lganda (68 000 mm⁻²), yuzada mo'rt qatlam va mikroyoriqlar paydo bo'lishini qayd etdilar. Bu ishlov berish parametrlarining optimal qiymati mavjudligini va ularni haddan tashqari oshirish yuza shikastlanishiga olib kelishini isbotlaydi; mazkur xulosa bizning tajribamizda $A = 25$ mkm bo'lganda g'adir-budurlikning ortish tendensiyasi bilan mos keladi.

Wu, Wang va boshqalar [3] UNSM don o'lchamini nanostruktura darajasigacha maydalab, yuzani deyarli shikastlamagan holda qattiqashtirishini va hatto g'adir-budurlikni yaxshilashini ko'rsatdilar. Shu bilan ular UTIBning an'anaviy zarbaviy mustahkamlash usullaridan, masalan, drob bilan otishdan (shot peening), ustunligini asoslادilar: shot peening yuqori qoldiq kuchlanish hosil qiladi, biroq yuzada nuqsonlar paydo bo'lishiga va g'adir-budurlikning ortishiga olib keladi.

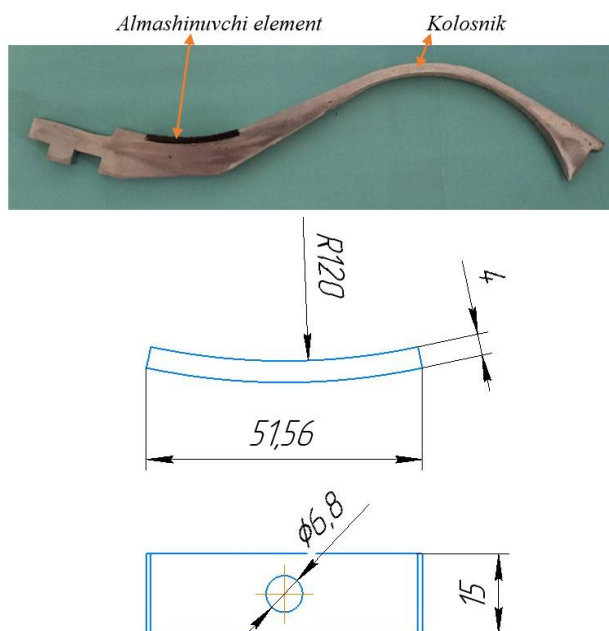
Tribologik yo'nalishda Amanov, Pyun va Sasaki [4] UNSM yuza pardozini yaxshilashi, siquvchi qoldiq kuchlanish hosil qilishi va mikrochuqurchali (micro-dimple) tuzilma shakllantirishi hisobiga ishqalanish hamda yeyilishni kamaytirishini ko'rsatdilar. Chang, Pyun va Amanov [5] ushbu usulni temiryo'l relsi (60 kgK po'lati)da qo'llab, g'ildirak–rels juftligining yeyilishga chidamliligini oshirdilar. Magazov va boshqalar [6] AISI 52100 podshipnik po'latida yeyilish hajmi ishqalanish koeffitsiyenti va qattqlik bilan bog'liqligini aniqladilar, ya'ni qattqlikni oshirish orqali ishqalanish va yeyilishni bir vaqtda boshqarish mumkin.

Umumlashtiruvchi sharhlar [7, 8] UNSM yuzaning qattiqligi, siquvchi qoldiq kuchlanish, charchoq va yeyilishga chidamliligini oshirishning samarali vositasi ekanini tasdiqlaydi. Masalan, titan qotishmalarida qattqlik 190 HV dan 385 HV gacha oshgan, donlarning maydalanish darajasi esa zarba yuki ortishi bilan chuqurlashgan.

Yuqoridagi tahlildan ko'rinadiki, xorijiy tadqiqotlar UTIB samaradorligini ishonchli tarzda isbotlagan. Biroq ular asosan aviatsiya, avtomo-

bilsozlik, podshipnik, temiryo‘l va tibbiyot sohalari uchun mo‘ljallangan qimmatbaho legirlangan yoki maxsus po‘latlar hamda qotishmalarga, shuningdek, charchoq va moylanadigan metall–metall juftliklariga qaratilgan. “Qattiq po‘lat yuza — quruq paxta tolasi” tribologik juftligi, ya’ni paxta tozalash mashinalarining ishchi organlariga nisbatan UTIB deyarli o‘rganilmagan. Bundan tashqari, podshipniklar uchun foydali bo‘lgan mikro-chuqurchali tuzilma tola bilan kontaktda maqbul emas; bu yerda tolani ilishtirmaydigan silliq va qattiq yuza talab etiladi. Demak, parametrlarni aynan ushbu qo‘llanish sohasi uchun qayta optimallashtirish zarur.

Tadqiqot obyekti — 4DP-130 arrali tola ajratgich kolosnigining ishchi qismiga vint orqali biriktiriladigan egri almashinuvchi element. Elementning tashqi ishchi yuzasi R120 mm radius bo‘yicha egilgan; yoy bo‘yicha uzunligi 51,56 mm, eni 15 mm, qalinligi 4 mm, biriktirish teshigining diametri esa Ø6,8 mm ni tashkil etadi (1-rasm). Egri yuza kolosnikning arralarga qaragan ishchi profiliga mos keladi.



1-rasm. Almashinuvchi elementning (insertning) chizmasi va asosiy o‘lchamlari.

Element materiali sifatida o‘rtacha uglerodli konstruksion Po‘lat 45 (GOST 1050) tanlandi. Mazkur po‘lat O‘zbekistonda, jumladan, Bekabad metallurgiya kombinati mahsulotlari orqali keng

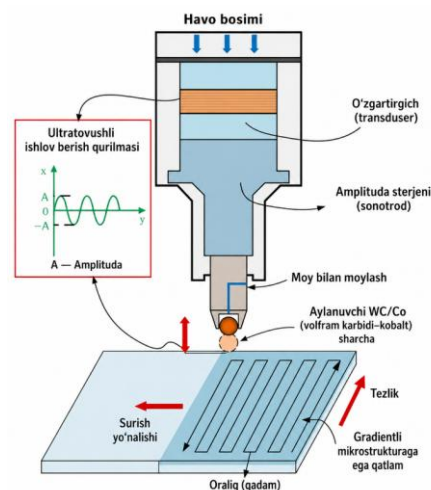
tarqalgan, nisbatan arzon va oson topiladi. Shuningdek, u yaxshi mexanik ishlanadi hamda termik va sirtiy mustahkamlash usullariga yaxshi javob beradi. Uning xalqaro ekvivalenti — yuqorida tahlil qilingan tadqiqotlarda [1, 2] samarali natijalar bergan S₄₅C po‘latidir. Materialning kimyoviy tarkibi 1-jadvalda keltirilgan. Ishlov berishdan oldin element normalizatsiyalangan holatda bo‘lib, uning dastlabki qattiqligi 210 HV ni tashkil etdi.

1-jadval

Po‘lat 45 ning kimyoviy tarkibi (GOST 1050), % (massa bo‘yicha)

C	Si	Mn	Cr (ko‘pi bilan)	S (ko‘pi bilan)	P (ko‘pi bilan)
0,42–0,50	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25	0,040	0,035

Ishlov berish ultratovushli generator, magnitostriksion konverter, konsentrator (to‘lqin uzatgich) va qattiq qotishmadan (WC) tayyorlangan sharsimon indentordan iborat qurilmada amalga oshirildi (2-rasm). Indentor statik kuch ta‘sirida yuzaga bosiladi va ultratovush chastotasida tebranib, unga yuqori chastotali zarbalar beradi. Ishlov berish rejimlari 2-jadvalda keltirilgan; asosiy o‘zgaruvchan omil sifatida tebranish amplitudasi A qabul qilindi.



2-rasm. Almashinuvchi element yuzasini ultratovushli ishlov berish sxemasi.

Yuza qattiqligi Vickers usulida (yuklama — 0,2 kgk) o‘lchandi; qattiqlashtirilgan qatlam chuqurligi ko‘ndalang kesim bo‘yicha mikro-qattqlik taqsimoti asosida aniqlandi. Yuza g‘adirbudurligi Ra profilometr yordamida o‘lchandi. Paxta tolasi bilan ishqalanish koeffitsiyenti f maxsus tribometrda tola tutamini ishlov berilgan yuza bo‘ylab tortish orqali aniqlandi. Yeyilishga

chidamlilik abraziv sinov jarayonida namuna massasining kamayishi asosida baholanib, ishlov berilmagan namunaga nisbatan foizlarda ifodalandi. Har bir tajriba uch marta takrorlandi va o'rtacha qiymat hisoblandi.

2-jadval

Ultratovushli ishlov berish rejim parametrlari

Parametr	Belgisi	Qiymati
Tebranish chastotasi	f, kGs	22
Tebranish amplitudasi	A, mkm	10; 15; 20; 25
Statik kuch	P, N	200
Indentor (WC shar) diametri	D, mm	8
Uzatma tezligi	v, mm/min	100
Yo'l qadami	s, mm	0,05
O'tishlar soni	n	2

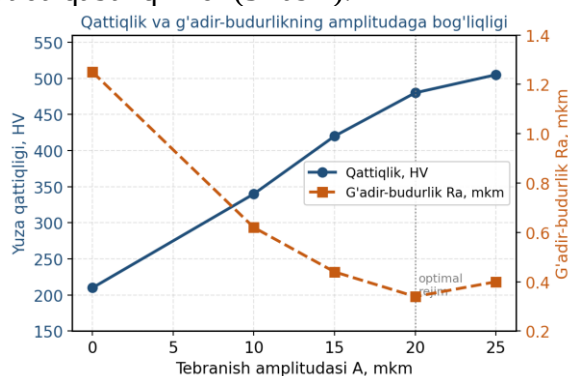
Natijalar. Ultratovushli ishlov berish rejimi parametrlarining yuza qattiqligi, g'adir-budurlik va ishqalanish koeffitsiyentiga ta'siri 3-jadvalda umumlashtirilgan.

3-jadval

Amplituda A ta'sirida yuza xarakteristikalarining o'zgarishi (P=200 N, n=2)

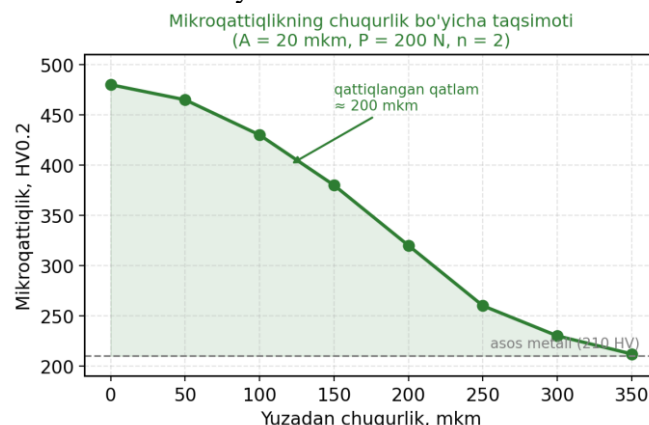
A, mkm	Qattqlik, HV	Ra, mkm	Qatlam, mkm	f (tola)
0 (dastlabki)	210	1,25	—	0,34
10	340	0,62	90	0,29
15	420	0,44	150	0,25
20	480	0,34	200	0,23
25	505	0,40	235	0,24

Amplitudaning ortishi bilan yuza qattiqligi muntazam ravishda oshib boradi: A=25 mkm da u 505 HV ga yetadi, ya'ni dastlabki qiymatdan 2,4 marta yuqori bo'ladi. G'adir-budurlik Ra esa A=20 mkm gacha kamayib, 0,34 mkm ni tashkil etadi, shundan so'ng amplitudaning ortishi bilan biroz ko'payadi. Bu holat ortiqcha zarba energiyasining yuzada mikronuqsonlar hosil qilishi bilan izohlanadi va Wu va boshqalarning [2] xulosalariga mos keladi. Shu bois A=20 mkm optimal rejim sifatida qabul qilindi (3-rasm).



3-rasm. Yuza qattiqligi va g'adir-budurlikning tebranish amplitudasiga bog'liqligi.

Optimal rejimda (A=20 mkm, P=200 N, n=2) mikroqattqlikning chuqurlik bo'yicha taqsimoti 4-rasmda keltirilgan. Eng yuqori qattqlik yuzada (480 HV) kuzatiladi va chuqurlik ortishi bilan asosiy metallning qiymatigacha (210 HV) bir tekis kamayadi. Qattqlashtirilgan qatlamning chuqurligi taxminan 200 mkm ni tashkil etadi, bu almashinuvchi elementning ishchi resursini ta'minlash uchun yetarlidir.



4-rasm. Mikroqattqlikning yuza bo'yicha chuqurlik kesimidagi taqsimoti (optimal rejim).

Olingan natijalar ultratovushli ishlov berishning yuqori chastotali zarbaviy plastik deformatsiya mexanizmi bilan izohlanadi hamda xorijiy tadqiqotlar [1, 3, 7] natijalari bilan yaxshi mos keladi. Indentorning uzluksiz zarbalari ta'sirida yuza qatlamida dislokatsiyalar zichligi keskin ortadi, donalar esa submikron va nanoo'lchamli darajagacha maydalanadi. Hall-Petch qonuniyatiga muvofiq, don o'lchamining kichrayishi materialning oquvchanlik chegarasi va qattqligini oshiradi. Bu holat yuzadagi qattqlikning 2,3 baravar ortishini tushuntiradi. Shu bilan birga, biz olgan natija (210→480 HV) Cao va boshqalar [1] hamda titan qotishmalari uchun keltirilgan ma'lumotlar (190→385 HV) [8] bilan bir tartibda.

Muhokama. Indentor yuzadagi mikroqirralarni tekislagani sababli g'adir-budurlik Ra sezilarli darajada kamayadi. Silliqlik va qattqlik yuza tola tutami bilan o'zaro ta'sirlashganda ishqalanish koeffitsiyentini pasaytiradi: tola yuza bo'ylab kamroq qarshilik bilan siljiydi. Bu, o'z navbatida, tolaning shikastlanishini va tola ajratgichning quvvat sarfini kamaytiradi. Magazov va boshqalar [6] ko'rsatganidek, yeyilish qattqlik va ishqalanish bilan bevosita bog'liq; demak, yuzani

qattiqlashtirish ayni vaqtda har ikkala ko'rsatkichni yaxshilaydi. Amplitudaning me'yoridan oshirilishi ($A=25$ mkm) esa ortiqcha deformatsiya va mikronuqsonlarning paydo bo'lishiga olib keladi [2], natijada R_a biroz ortadi. Shuning uchun ishqalanish koeffitsiyentining $0,23-0,25$ oralig'idagi qiymati tolani ishonchli ilish va uni shikastlamaslik nuqtai nazaridan maqbul hisoblanadi.

Yuza qatlamiga kiritiladigan siquvchi qoldiq kuchlanishlar va donlarning maydalanishi yeyilishga chidamlilikni oshiradi: abraziv zarrachalar qattiq va zich yuzaga kamroq ta'sir ko'rsatadi. Natijada nisbiy yeyilish 45% ga kamaydi, bu esa almashinuvchi elementning xizmat muddatini taxminan $1,7-1,8$ marta uzaytirish imkonini beradi. Amaliyot nuqtai nazaridan, bu kolosniklarni almashtirish chastotasini, tola ajratgichning to'xtab turish vaqtini va ehtiyot qismlarga sarflanadigan xarajatlarni kamaytiradi.

Ishning ilmiy yangiligi shundan iboratki, xorijiy tadqiqotlarda UTIB asosan qimmatbaho materiallar va metall–metall juftligi uchun qo'llangan bo'lsa, ushbu ishda mazkur usul arzon va mahalliy Po'lat 45 dan tayyorlangan tola ajratgich kolosnigi insertiga "po'lat–paxta tolasi" juftligini optimallashtirish maqsadida qo'llanildi. Bu 4DP-130 rusumli tola ajratgichlarni O'zbekistonda ta'mirlash va modernizatsiya qilishda mahalliy lashtirish darajasini oshirish imkonini beradi.

Xulosa. Xorijiy adabiyotlar tahlili ultra-

tovushli ishlov berish yuza qattiqligi, siquvchi qoldiq kuchlanish va yeyilishga chidamlilikni oshirishning samarali usuli ekanini, xususan, S₄₅C (Po'lat 45) po'lati uchun ijobiy natijalar berishini tasdiqladi.

4DP-130 rusumli arrali tola ajratgich kolosnigining almashinuvchi elementi uchun O'zbekistonda arzon va keng tarqalgan Po'lat 45 materiali tanlandi hamda uning ishchi yuzasiga ultratovushli ishlov berish samaradorligi tajriba yo'li bilan tekshirildi.

Optimal ishlov berish rejimi aniqlandi: chastota — 22 kGs, amplituda — $A=20$ mkm, statik kuch — $P=200$ N, o'tishlar soni — $n=2$. Mazkur rejimda yuza qattiqligi 210 HV dan 480 HV gacha, ya'ni $2,3$ marta oshdi; qattiqlangan qatlam chuqurligi ≈ 200 mkm ni tashkil etdi, g'adibudurlik ko'rsatkichi esa $R_a=1,25$ mkm dan $0,34$ mkm gacha kamaydi.

Taklif etilgan yechim iqtisodiy jihatdan samarali bo'lib, 4DP-130 rusumli tola ajratgichlarni ta'mirlash va modernizatsiya qilishda amaliy qo'llanilishi mumkin. Kelgusi tadqiqotlarda ishlov berish rejimlarini javob yuzasi usuli (RSM) va genetik algoritim yordamida ko'p mezonli optimallashtirish rejalashtirilgan.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Cao, X. J., Pyoun, Y. S., & Murakami, R. (2010). Fatigue properties of a S45C steel subjected to ultrasonic nanocrystal surface modification. *Applied Surface Science*, 256(21), 6297–6303. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.04.007>
- [2] Wu, B., Zhang, J., Zhang, L., Pyoun, Y. S., & Murakami, R. (2014). Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on surface and fatigue properties of quenching and tempering S45C steel. *Applied Surface Science*, 321, 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.068>
- [3] Wu, B., Wang, P., Pyoun, Y. S., Zhang, J., & Murakami, R. (2013). Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue behaviors of plasma-nitrided S45C steel. *Surface and Coatings Technology*, 213, 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.063>
- [4] Amanov, A., Pyun, Y. S., & Sasaki, S. (2014). Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy. *Tribology International*, 72, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.12.003>
- [5] Chang, S., Pyun, Y. S., & Amanov, A. (2017). Wear enhancement of wheel-rail interaction by ultrasonic nanocrystalline surface modification technique. *Materials*, 10(2), Article 188. <https://doi.org/10.3390/ma10020188>

- [6] Magazov, N., Satbaeva, Z., Rakhadilov, B., & Amanov, A. (2023). A study on surface hardening and wear resistance of AISI 52100 steel by ultrasonic nanocrystal surface modification and electrolytic plasma surface modification technologies. *Materials*, 16(21), Article 6824. <https://doi.org/10.3390/ma16206824>
- [7] John, M., Kuruveri, U. B., & Menezes, P. L. (2022). Ultrasonic nanocrystal surface modification: Processes, characterization, properties, and applications. *Nanomaterials*, 12(9), Article 1415. <https://doi.org/10.3390/nano12091415>
- [8] Ye, H., Sun, X., Liu, Y., et al. (2021). Application of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) technique for surface strengthening of titanium and titanium alloys: A mini review. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 351–377. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.013>
- [9] Панин, В. Е., и др. (2015). Влияние ультразвуковой обработки на структуру и свойства поверхностного слоя конструкционных сталей. *Физическая мезомеханика*, (4), 5–14.
- [10] Мирошниченко, Ф. Д. (1985). Теория и расчёт рабочих органов джинов. Ташкент: Фан.
- [11] Джураев, А., & Максудов, Р. (2012). Технологические машины и оборудование хлопкоочистительного производства. Ташкент: Мехнат.
- [12] ГОСТ 1050. (n.d.). Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия.
- [13] Axmedov, X. (2024). Paxta tozalash mashinalari ishchi organlarining tebranish va konstruksion tahlili masalalari. *Mexanika muammolari*. Toshkent.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Axmedov, X. A., & Xaydarova, M. X. (2026). Tola ajratgich kolosnigi almashinuvchi elementining ishchi yuzasini ultratovushli ishlov berish orqali qattiqligini oshirish tadqiqotlari. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.42>

УДК: 62-52

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.10

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ХЛОПКА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЛОКНА



Хамзаев Дилшод Иномджонович

Системный администратор АО «Farg'onaazot», Фергана, Узбекистан

E-mail: loed666@mail.com

ORCID ID: 0009-0003-3815-5606

Science ID: MFR-0226-0041

Аннотация. Контроль влажности хлопкового сырья является ключевым фактором обеспечения качества продукции в лёгкой промышленности и играет значительную роль на всех стадиях технологической цепочки — от первичной обработки и транспортировки до складского хранения. Современные электрические средства измерения, основанные на анализе сопротивления и диэлектрических свойств материала, позволяют оперативно и с высокой точностью определять содержание влаги, а также легко интегрируются в состав автоматизированных и мехатронных систем управления. В работе подробно анализируются физические основы функционирования электрических влагомеров, раскрываются особенности их применения в технологических процессах переработки хлопка, рассматриваются их достоинства и существующие ограничения, а также обозначаются направления дальнейшего совершенствования. Дополнительно представлен разработанный авторами модуль, обеспечивающий непрерывный мониторинг влажности хлопкового волокна в режиме реального времени непосредственно в производственном процессе.

Ключевые слова: диэлектрический сенсор, хлопковое волокно, диэлектрическая проницаемость, влажность, частотные характеристики, функция чувствительности, сушилка хлопка.

Received: 25.06.2026

Accepted: 09.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

DIELEKTRIK XOSSALARINING O'ZGARISHI ASOSIDA PAXTA TOLASI NAMLIGINI REAL VAQT REJIMIDA O'LCHASH

Xamzayev Dilshod Inomdjonovich

“Farg'onaazot” AJ tizim administratori, Farg'ona, O'zbekiston

Annotatsiya. Paxta xomashyosi namligini nazorat qilish yengil sanoatda mahsulot sifatini ta'minlashning muhim omillaridan biri bo'lib, texnologik zanjirning barcha bosqichlarida — dastlabki ishlov berish va tashishdan tortib omborlarda saqlashgacha — katta ahamiyat kasb etadi. Materialning elektr qarshiligi va dielektrik xossalarini tahlil qilishga asoslangan zamonaviy elektr o'lchash vositalari namlik miqdorini tezkor va yuqori aniqlikda aniqlash imkonini beradi, shuningdek, avtomatlashtirilgan va mexatronik boshqaruv tizimlariga oson integratsiya qilinadi. Maqolada elektr namlik o'lchagichlarning ishlash fizik asoslari batafsil tahlil qilingan, ularni paxtani qayta ishlash texnologik jarayonlarida qo'llash xususiyatlari yoritilgan, afzalliklari va mavjud cheklovlari ko'rib chiqilgan ham-

da kelgusida takomillashtirish yo'nalishlari belgilangan. Bundan tashqari, mualliflar tomonidan ishlab chiqilgan, bevosita ishlab chiqarish jarayonida paxta tolasi namligini real vaqt rejimida uzluksiz monitoring qilish imkonini beruvchi modul taqdim etilgan.

Kalit so'zlar: dielektrik sensor, paxta tolasi, dielektrik singdiruvchanlik, namlik, chastotaviy xarakteristikalar, sezgirlik funksiyasi, paxta quritgichi.

REAL-TIME MEASUREMENT OF COTTON MOISTURE BASED ON CHANGES IN THE DIELECTRIC PROPERTIES OF THE FIBER

Khamzaev Dilshod Inomdjonovich

System Administrator, JSC "Farg'onaazot", Fergana, Uzbekistan

Abstract. Moisture control of raw cotton is a key factor in ensuring product quality in the light industry and plays an important role at all stages of the technological chain, from primary processing and transportation to warehouse storage. Modern electrical measuring devices based on the analysis of electrical resistance and dielectric properties of the material enable rapid and highly accurate determination of moisture content and can be readily integrated into automated and mechatronic control systems. This study provides a detailed analysis of the physical principles underlying the operation of electrical moisture meters, describes the specific features of their application in cotton processing technologies, examines their advantages and existing limitations, and identifies directions for further improvement. In addition, a module developed by the authors is presented that provides continuous real-time monitoring of cotton fiber moisture directly during the production process.

Keywords: dielectric sensor, cotton fiber, dielectric permittivity, moisture content, frequency characteristics, sensitivity function, cotton dryer.

Введение. Хлопок является одним из важнейших сельскохозяйственных продуктов, широко используемым в текстильной, медицинской и других отраслях. Определение влажности хлопкового сырья является ключевым этапом в технологической цепочке его переработки. Точность измерения напрямую влияет на эффективность процессов сушки, хранения и качества конечного продукта. В современных условиях особое значение приобретают автоматизированные системы контроля, основанные на электрических методах измерения. Несмотря на наличие различных методов (резистивных, ёмкостных, частотных), остаются нерешёнными вопросы повышения точности измерений в условиях нестабильных технологических параметров. В связи с этим актуальной задачей является разработка эффективных методов измерения и управления процессом сушки хлопка. Целью данной работы является разработка методологии измерения влажности и оптимизации режимов сушки хлопкового сырья. Влажность хлопка существенно влияет на технологические процессы, массу продукции,

энергозатраты при сушке и риск биологических повреждений при хранении. Традиционные методы, такие как гравиметрический или Карл-Фишер титрование, точны, но трудоёмки и медленны. Электрические влагомеры, основанные на измерении диэлектрической проницаемости или сопротивления, предлагают экспресс-методы, которые обеспечивают оперативность и автоматизацию. Диэлектрический сенсор влажности основан на зависимости диэлектрической проницаемости материала от содержания в нём влаги. Хлопковое волокно представляет собой гигроскопичный капиллярно-пористый материал, способный адсорбировать и удерживать влагу как в свободном, так и в связанном состоянии.

Относительная диэлектрическая проницаемость сухого хлопка составляет:

$$\epsilon_{\text{сух}} \approx 2 - 4 \quad (1)$$

В то время как диэлектрическая проницаемость воды при комнатной температуре:

$$\epsilon_{\text{вода}} \approx 80 \quad (2)$$

Таким образом, даже незначительное увеличение содержания влаги приводит к

существенному изменению эффективной диэлектрической проницаемости материала:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} \approx f(W) \quad (3)$$

где, W — массовая или относительная влажность материала.

Изменение диэлектрической проницаемости влияет на ёмкость измерительной системы или параметры электромагнитного поля, что и используется для определения влажности.

Литературный анализ и методология. В рамках исследования был проведён анализ современных научных публикаций, посвящённых методам определения влажности хлопкового сырья и управлению процессами его сушки. Рассмотрены работы, описывающие резистивные, ёмкостные и частотные методы измерения влажности, а также подходы к автоматизации сушильных установок. Установлено, что существующие решения обеспечивают достаточную точность измерений, однако имеют ограничения в условиях изменяющихся технологических параметров и требуют адаптации к конкретным производственным условиям. Методологическая основа исследования базируется на системном подходе и принципах мехатроники, включающих интеграцию измерительных сенсоров, управляющих алгоритмов и исполнительных механизмов. В работе использованы методы математического моделирования, экспериментального анализа и сравнительной оценки эффективности различных режимов сушки. Для обработки экспериментальных данных применялись методы статистического анализа, позволяющие определить оптимальные параметры технологического процесса. Разработка алгоритма управления сушкой осуществлялась с учётом зависимости влажности хлопка от температуры, скорости воздушного потока и времени обработки. Предложенная методология направлена на повышение точности измерения влажности и оптимизацию режимов сушки с целью снижения энергозатрат и повышения качества конечного продукта.

Принцип действия сенсора. Диэлектрический сенсор представляет собой измерительную ячейку, состоящую из электродной системы, между которыми располагается

контролируемый материал (хлопковое волокно). При подаче переменного электрического поля высокой частоты происходит:

- поляризация молекул воды,
- изменение распределения электрического поля,
- изменение ёмкости измерительной системы.

Измеряемый параметр может быть:

- ёмкость C ,
- тангенс угла диэлектрических потерь,
- частота резонансного контура,
- импеданс среды.

Например, при ёмкостном методе:

$$C = \varepsilon_{\text{эфф}} \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (4)$$

где: ε_0 — электрическая постоянная, S — площадь электродов, d — расстояние между электродами.

Изменение $\varepsilon_{\text{эфф}}$ приводит к изменению ёмкости C , что регистрируется электронной системой обработки сигнала. Далее сигнал преобразуется в цифровое значение влажности после калибровки.

Работа в реальном времени. Одним из ключевых преимуществ диэлектрических сенсоров является возможность непрерывного измерения влажности в динамическом процессе. В отличие от:

- гравиметрического метода (требующего сушки образца),
 - химических методов,
 - лабораторных анализов.
- диэлектрический сенсор обеспечивает:
- мгновенную регистрацию изменений,
 - отсутствие необходимости отбора проб,
 - непрерывный контроль параметров технологического процесса.

В сушильных установках это позволяет:

- регулировать температуру теплоносителя,
- изменять скорость барабана,
- корректировать расход воздуха,
- предотвращать пересушивание волокон,
- снижать энергозатраты.

Время отклика сенсора обычно составляет миллисекунды–секунды, что обеспечивает работу в режиме online-контроля.

Экспериментальные исследования и результаты.

Экспериментальная установка. Экспериментальные исследования проводились на базе промышленной сушильной установки барабанного типа, применяемой для обработки хлопкового сырья. В качестве измерительного устройства использовался разработанный диэлектрический сенсор, работающий в диапазоне частот 10–30 МГц. Сенсор устанавливался непосредственно в зоне выхода материала из сушильного барабана, что позволяло осуществлять непрерывный контроль влажности в режиме реального времени. Для повышения точности измерений была реализована температурная компенсация. Контрольные значения влажности определялись гравиметрическим методом (метод высушивания до постоянной массы), используемым в качестве эталонного. В ходе эксперимента варьировались следующие параметры:

- температура теплоносителя: 70–110 °С;
- скорость воздушного потока: 1,5–2,5 м/с;
- время пребывания материала в барабане: 5–12 мин;
- начальная влажность хлопка: 12–15 %.

Результаты измерений. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерения влажности хлопкового сырья

№ опыта	Температура, °С	Скорость воздуха, м/с	Влажность (сенсор), %	Влажность (эталон), %	Погрешность, %
1	70	1.5	8.3	8.1	0.2
2	80	1.8	7.6	7.4	0.2
3	90	2.0	6.8	6.5	0.3
4	100	2.2	6.1	5.9	0.2
5	110	2.5	5.7	5.5	0.2

Средняя абсолютная погрешность измерений составила $\pm 0,32$ %, что подтверждает высокую точность предложенного метода.

Анализ зависимости влажности от температуры. В ходе эксперимента установлено, что повышение температуры теплоносителя приводит к интенсивному снижению остаточной влажности хлопкового волокна. При увеличении температуры с 70 до 110 °С влажность уменьшается в среднем на 30–35%. Наиболее эффективный диапазон температур составляет 90–100 °С, при котором

достигается оптимальное соотношение между скоростью удаления влаги и энергозатратами. При температурах выше 110 °С наблюдается риск пересушивания материала и ухудшения качества волокна.

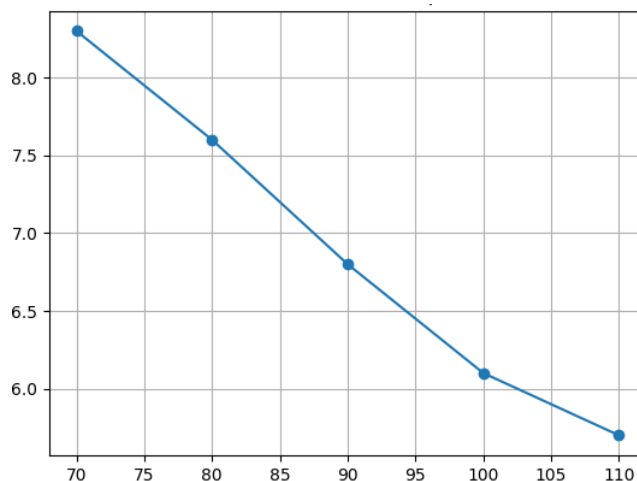


Рис. 1. Зависимость остаточной влажности хлопкового волокна от температуры теплоносителя.

Представлена зависимость остаточной влажности хлопкового сырья от температуры теплоносителя. Анализ графика показывает, что с увеличением температуры от 70 до 110 °С наблюдается устойчивое снижение влажности материала. Наиболее эффективный диапазон температур составляет 90–100 °С, при котором достигается оптимальное соотношение между интенсивностью сушки и энергозатратами.

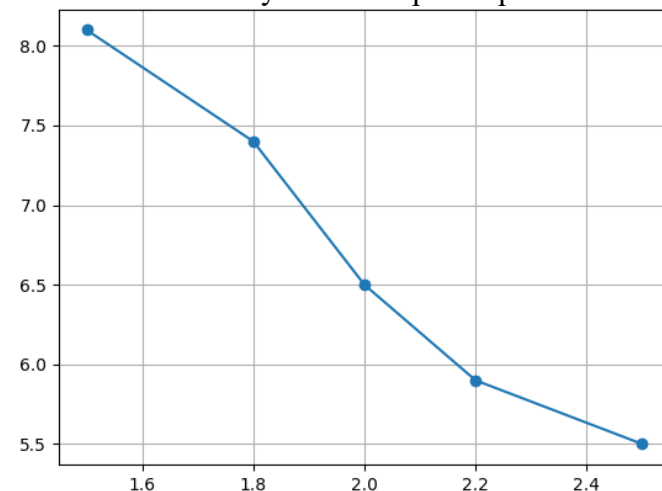


Рис. 2. Зависимость влажности хлопка от скорости воздушного потока.

Показано влияние скорости воздушного

потока на конечную влажность материала. Установлено, что увеличение скорости воздуха до 2,0–2,2 м/с приводит к значительному снижению влажности. При дальнейшем увеличении скорости эффект становится менее выраженным, что свидетельствует о наличии оптимального диапазона.

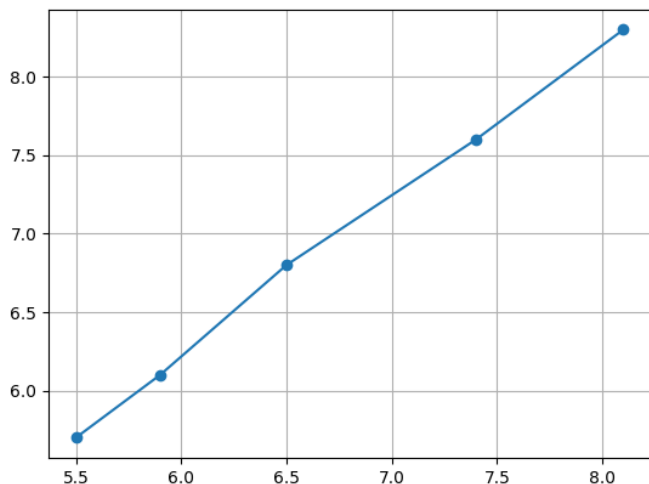


Рис.3. Сравнение показаний диэлектрического сенсора и эталонного метода.

Представлено сопоставление результатов измерений влажности, полученных с использованием разработанного сенсора и гравиметрического метода. Наблюдается высокая степень совпадения данных, что подтверждает достоверность измерений. Отклонение не превышает $\pm 0,3$ %, что соответствует требованиям промышленного контроля.

Влияние скорости воздушного потока. Увеличение скорости воздушного потока способствует:

- ускорению испарения влаги;
- повышению интенсивности тепло- и массообмена.

Однако при превышении значения 2,5 м/с наблюдается:

- увеличение энергопотребления;
- незначительное улучшение конечной влажности. Оптимальный диапазон скорости воздуха составляет 1,8–2,2 м/с.

Оценка энергозатрат. В рамках эксперимента было проведено сравнение работы сушильной установки:

- без системы автоматического контроля;

– с использованием разработанного диэлектрического сенсора.

Установлено, что внедрение системы реального времени позволяет:

- снизить удельные энергозатраты с 118 кВт·ч/т до 92 кВт·ч/т;
- обеспечить экономию энергии на уровне ≈ 22 %;
- сократить время сушки на 10–15 %.

Динамика измерений в реальном времени. В процессе испытаний установлено, что время отклика сенсора составляет менее 1 секунды, что обеспечивает возможность оперативной корректировки режимов сушки. Сигнал сенсора характеризуется высокой стабильностью и низким уровнем шумов благодаря применению цифровой фильтрации и усреднения.

Обсуждение результатов. Полученные экспериментальные данные подтверждают:

- высокую чувствительность диэлектрического метода к изменениям влажности;
- возможность использования сенсора в условиях промышленного производства;
- эффективность интеграции в систему автоматического управления сушкой.

Сравнение с эталонным методом показало, что разработанный сенсор обеспечивает точность, сопоставимую с лабораторными методами, при значительно более высокой скорости измерений.

Обсуждение. Полученные результаты согласуются с данными ранее опубликованных исследований, однако предложенный подход отличается комплексной интеграцией измерительной и управляющей подсистем. Это позволяет повысить адаптивность системы к изменяющимся условиям эксплуатации. В отличие от традиционных методов, предложенная методология учитывает динамику изменения параметров процесса, что обеспечивает более эффективное управление сушкой. Ограничением исследования является необходимость дополнительной калибровки системы для различных сортов хлопка.

Электрофизическая природа частотной зависимости. Любой диэлектрик при воздействии переменного электрического поля

характеризуется комплексной диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \quad (5)$$

где: $\varepsilon'(\omega)$ — действительная часть (характеризует способность накапливать энергию), $\varepsilon''(\omega)$ — мнимая часть (характеризует диэлектрические потери), $\omega = 2\pi f$ — круговая частота.

В хлопковом волокне присутствуют:

- полярные молекулы воды,
- связанная влага,
- свободная капиллярная вода,
- целлюлозная матрица.

Каждый из этих компонентов имеет собственные механизмы поляризации (электронная, дипольная, ионная, межфазная), которые проявляются в различных частотных диапазонах. Поэтому реакция материала на переменное поле носит частотно-зависимый характер.

Определение частотной характеристики сенсора. Частотная характеристика сенсора — это зависимость выходного сигнала (амплитуды и фазы) от частоты возбуждающего электрического сигнала.

Если сенсор описывается комплексным импедансом:

$$Z(\omega) = R(\omega) - jX(\omega) \quad (6)$$

то измеряются: амплитудная характеристика: $|Z(\omega)|$ фазовая характеристика:

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{X(\omega)}{R(\omega)}\right) \quad (7)$$

Изменение влажности приводит к изменению как модуля импеданса, так и фазового сдвига. Таким образом, сенсор фактически является частотно-зависимой измерительной системой, чувствительной к структуре и состоянию влаги в материале.

Частотная дисперсия влаги. Вода имеет ярко выраженную дипольную поляризацию. При низких частотах (кГц диапазон):

- диполи успевают ориентироваться по полю,
- наблюдается высокая диэлектрическая проницаемость,
- возрастают потери.

При увеличении частоты (МГц диапазон):

- диполи не успевают следовать за полем,
- ε' уменьшается,

- снижается вклад проводимости.

На сверхвысоких частотах (ГГц диапазон):

- проявляется релаксационный пик воды,
- повышается селективность измерения влажности.

Таким образом, отклик сенсора существенно зависит от частоты возбуждения.

Значение выбора оптимальной частоты.

Выбор рабочей частоты является критическим параметром проектирования сенсора. Оптимальная частота определяется из условия:

$$\max\left(\frac{dS}{dW}\right) \quad (8)$$

при минимальном уровне шумов где: S — выходной сигнал, W — влажность.

При слишком низкой частоте:

- усиливается влияние электропроводности,
- возрастает влияние плотности укладки волокон,
- появляются паразитные емкостные эффекты.

При слишком высокой частоте:

- уменьшается глубина проникновения поля,
- снижается чувствительность к связанной влаге,
- усложняется аппаратная реализация.

Практически для хлопкового волокна применяются:

- высокочастотный диапазон (1–50 МГц),
- реже — микроволновой диапазон (1–10 ГГц) для глубокого анализа структуры влаги.

Амплитудно-фазовый анализ. Анализ не только амплитуды, но и фазового сдвига повышает информативность метода. Фазовый угол позволяет разделить:

- вклад ёмкостной составляющей (связанной с диэлектрической проницаемостью),

- вклад проводимости (свободная влага).

Комплексный анализ позволяет:

- повысить точность измерений;
- уменьшить влияние температуры;
- компенсировать плотность слоя;
- реализовать многочастотный метод измерения.

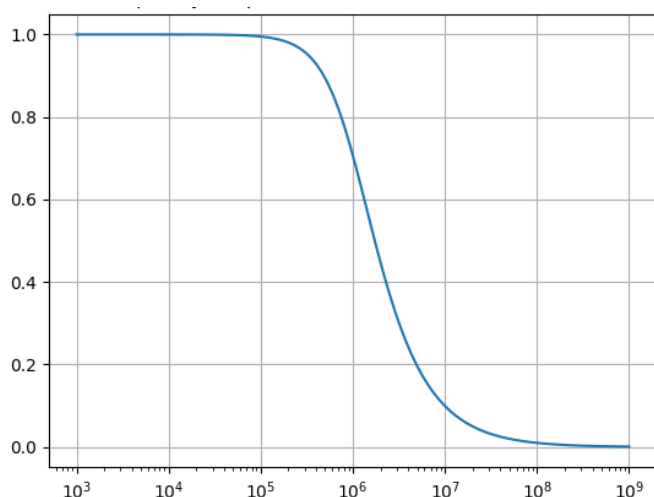


Рис.4. Частотная характеристика диэлектрического сенсора влажности.

На графике 4 представлена амплитудно-частотная характеристика диэлектрического сенсора влажности. График демонстрирует зависимость нормированного выходного сигнала от частоты возбуждающего электромагнитного поля. Анализ показывает, что в области низких частот (до 10^5 – 10^6 Гц) наблюдается высокая чувствительность сенсора, обусловленная ориентационной поляризацией молекул воды. С увеличением частоты происходит снижение амплитуды сигнала, что связано с инерционностью дипольной поляризации и уменьшением вклада проводимости. В диапазоне высоких частот (выше 10^7 Гц) чувствительность стабилизируется, что делает данный диапазон предпочтительным для практического применения в условиях промышленного контроля влажности. Таким образом, выбор рабочей частоты в диапазоне 1–30 МГц является обоснованным компромиссом между чувствительностью, глубиной проникновения поля и устойчивостью к помехам.

Преимущества частотного подхода в сушильных установках. Использование оптимально выбранной частоты обеспечивает:

- максимальную чувствительность к изменениям влажности;
- минимизацию шумов и паразитных эффектов;
- устойчивость к технологическим колебаниям;
- повышение точности до $\pm 0,2$ – $0,3$ %.

В интеллектуальных системах управления сушкой возможно применение адаптивного частотного сканирования, при котором рабочая частота автоматически корректируется в зависимости от текущего диапазона влажности.

Частотная характеристика диэлектрического сенсора является фундаментальным параметром, определяющим его чувствительность, селективность и устойчивость к помехам. Оптимизация рабочей частоты позволяет существенно повысить точность измерения влажности хлопкового волокна и обеспечить эффективное управление процессом сушки в реальном времени.

Выводы. Разработанная методология измерения влажности и управления процессом сушки позволяет повысить точность контроля и снизить энергозатраты. Полученные результаты могут быть использованы при создании интеллектуальных сушильных установок в текстильной промышленности. Модуль позволяет точно контролировать влажность хлопка в реальном времени. Используется для оптимизации режима сушки:

- Уменьшение времени сушки,
- Экономия энергии,
- Сохранение качества волокна,
- В отличие от традиционных методов (весовой анализ, гравиметрия, сушильные шкафы).

Модуль:

- Не требует разрушения образца,
- Обеспечивает непрерывный мониторинг,
- Позволяет интегрировать в мехатронную систему управления сушкой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Курбатов, С. А. (2019). Методы измерения влажности волокнистых материалов. Легпромпиздат.
- [2] Goyal, R. K., et al. (2020). Moisture measurement techniques for agricultural products: A review. Journal of Agricultural Engineering.

- [3] Карасёв, А. П. (2021). Электрические свойства текстильных материалов. Текстильная промышленность.
- [4] Хамзаев, Д. И. (2025). Быстрое определение влажности хлопка. Цифровые технологии в промышленности, 3(4), 236–239. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.3.4.2025.8>
- [5] Хамзаев, Д. (2025). Современные методы и технологические подходы к оперативному определению влажности хлопка. Ta'lim, fan va innovatsiya, (5).
- [6] Хамзаев, Д. И. (2025). Современные методы и технологии для быстрого определения влажности хлопка. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16939010>
- [7] Хамзаев, Д. (2025). Инфракрасные влагомеры хлопка: принципы действия, особенности и перспективы применения. TechScience.Uz – Topical Issues of Technical Sciences, 3(11), 40–45. <https://doi.org/10.47390/ts-v3i11y2025No5>
- [8] Хамзаев, Д. И. (2024). Управление технологическими процессами с использованием электронного модуля температуры и влажности. Sanoatda raqamli texnologiyalar / Цифровые технологии в промышленности, 2(4-1), 124–130.
- [9] Yang, L., & Wu, D. (2019). Real-time moisture detection in cotton using microwave sensing. Applied Thermal Engineering, 163, 114376. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114376>
- [10] Chen, Y., Zhang, H., & Wang, X. (2020). Design and optimization of a cotton drying control system based on infrared technology. Journal of Textile Engineering, 36(4), 245–252.
- [11] AQUA-LAB. (n.d.). Влагомеры хлопка. <https://xn----7sbabfc9cl.xn--p1ai/253-vlagomery-khlopka>
- [12] Smith, J., & Brown, T. (2023). Advances in impedance-based moisture sensors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.
- [13] Соловьёв, С. А. (2021). Инфракрасные методы измерения влажности. Наука.
- [14] Bannon, D. I. (2020). Near-infrared spectroscopy for agricultural moisture measurement. Applied Spectroscopy Reviews.
- [15] Лысенко, В. Н. (2019). Влагомерный контроль текстильного сырья. Текстильная промышленность.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Хамзаев, Д. И. (2026). Измерение влажности хлопка в реальном времени на основе изменения диэлектрических свойств волокна. Цифровые технологии в промышленности, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.10>

EKOLOGIYA, MEHNAT MUHOFAZASI VA TEXNIKA XAVFSIZLIGI
ЭКОЛОГИЯ, ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
ECOLOGY, LABOR PROTECTION AND TECHNICAL SAFETY

UDC: 66.091

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.43

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

PRODUCTION OF BIOETHANOL FROM INDIGENOUS ARTEMISIA
BIOMASS



Madarova Surayyo Uralovna

2nd-Year Basic Doctoral Student, University of "New Uzbekistan", Tashkent, Uzbekistan

E-mail: s.madarova@newuu.uz

ORCID ID: 0009-0007-8815-3552

Abstract. This paper analyzes the potential of Artemisia biomass, widely distributed in the arid regions of Uzbekistan, for bioethanol production based on a review of the scientific literature. The main technological stages of bioethanol production and the effects of hydrolysis and fermentation on bioethanol yield were evaluated. A systematic literature review, comparative analysis, and synthesis methods were employed. The results showed that the cellulose and hemicellulose fractions of Artemisia biomass are important carbohydrate sources for bioethanol production. Fermentation temperature was found to have a significant effect on bioethanol yield, with 30 °C identified as the optimum temperature. In addition, the Separate Hydrolysis and Fermentation (SHF) process was shown to have the potential to improve process efficiency. The findings indicate that Artemisia biomass is a promising indigenous lignocellulosic feedstock for future bioethanol production. Further research should focus on optimizing pretreatment, hydrolysis, and fermentation conditions, as well as evaluating the techno-economic feasibility of the process.

Keywords: Artemisia diffusa, bioethanol, hydrolysis, fermentation, Saccharomyces cerevisiae, renewable energy, biofuel, Uzbekistan.

Received: 05.09.2026

Accepted: 24.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

ПРОИЗВОДСТВО БИОЭТАНОЛА ИЗ МЕСТНОЙ БИОМАССЫ
ARTEMISIA

Мадарова Сурайё Ураловна

2-й годовой базовый докторант Университета «Новый Узбекистан», Ташкент, Узбекистан

Annotatsiya. В данной статье на основе анализа научной литературы рассмотрен потенциал биомассы Artemisia, широко распространённой в засушливых регионах Узбекистана, для производства биоэтанола. Оценены основные технологические стадии производства биоэтанола, а также влияние процессов гидролиза и ферментации на выход биоэтанола. В

исследовании использованы методы систематического обзора литературы, сравнительного анализа и обобщения. Результаты показали, что целлюлоза и гемицеллюлоза, содержащиеся в биомассе *Artemisia*, являются важными источниками углеводов для производства биоэтанола. Установлено, что температура ферментации оказывает существенное влияние на выход биоэтанола, при этом оптимальной является температура 30 °C. Кроме того, показано, что технология раздельного гидролиза и ферментации обладает потенциалом для повышения эффективности процесса. Полученные результаты свидетельствуют о том, что биомасса *Artemisia* является перспективным местным лигноцеллюлозным сырьём для производства биоэтанола. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию предварительной обработки, гидролиза и ферментации, а также на оценку технико-экономической эффективности данного процесса.

Ключевые слова: *Artemisia diffusa*, биоэтанол, гидролиз, ферментация, *Saccharomyces cerevisiae*, возобновляемая энергия, биотопливо, Узбекистан.

MAHALLIY ARTEMISIA BIOMASSASIDAN BIOETANOL ISHLAB CHIQRISH

Madarova Surayyo Uralovna

“Yangi O‘zbekiston” universitetining 2-bosqich tayanch doktranti, Toshkent, O‘zbekiston

Annotatsiya. Mazkur maqolada O‘zbekistonning qurg‘oqchil hududlarida keng tarqalgan *Artemisia* biomassasining bioetanol ishlab chiqarishdagi salohiyati ilmiy adabiyotlar asosida tahlil qilindi. Tadqiqotda bioetanol ishlab chiqarishning asosiy texnologik bosqichlari, gidroliz va fermentatsiya jarayonlarining bioetanol hosildorligiga ta’siri baholandi. Tizimli adabiyotlar tahlili, qiyosiy tahlil va umumlashtirish metodlaridan foydalanildi. Natijalar *Artemisia* biomassasi tarkibidagi selluloza va gemisellyulozaning bioetanol ishlab chiqarish uchun muhim uglevod manbai ekanligini ko‘rsatdi. Fermentatsiya haroratining bioetanol hosildorligiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi aniqlanib, 30 °C optimal harorat sifatida belgilandi. Shuningdek, alohida gidroliz va fermentatsiya texnologiyasi jarayon samaradorligini oshirish imkoniyatiga ega ekanligi qayd etildi. Olingan natijalar kelajakda *Artemisia* biomassasi bioetanol ishlab chiqarish uchun istiqbolli mahalliy lignosellyulozali xomashyo ekanligini ko‘rsatadi. Kelgusida dastlabki ishlov berish, gidroliz va fermentatsiya parametrlarini optimallashtirish hamda texnik-iqtisodiy samaradorlikni baholash bo‘yicha kompleks tadqiqotlar o‘tkazish maqsadga muvofiqdir.

Kalit so‘zlar: *Artemisia diffusa*, bioetanol, gidroliz, fermentatsiya, *Saccharomyces cerevisiae*, qayta tiklanuvchi energiya, bioyoqilg‘i, O‘zbekiston.

Introduction. In recent years, growing global energy demand, the depletion of fossil fuel reserves, and increasing environmental concerns associated with fossil fuel consumption have intensified interest in renewable energy sources [1]. Among the various biofuels considered for the transportation sector, bioethanol has emerged as a promising alternative fuel because of its renewable nature, relatively low environmental impact, and compatibility with existing gasoline engines [2].

Preliminary data for 2020 indicate that Uzbekistan remained dependent on imports to satisfy part of its domestic demand for petroleum products. Imports accounted for approximately 30%

of diesel fuel consumption, 19% of motor gasoline consumption, and 35% of fuel oil consumption [3]. These figures highlight the importance of exploring alternative and locally available energy resources.

At present, bioethanol is predominantly produced from food crops such as sugarcane, corn, and wheat [4]. However, the extensive use of food crops for fuel production may create competition with food production and raise concerns regarding food security. Consequently, increasing attention has been directed toward the development of bioethanol production technologies based on lignocellulosic biomass [5]. Unlike conventional food-based feedstocks, lignocellulosic biomass does

not directly compete with food resources, is renewable, and contains substantial amounts of cellulose and hemicellulose, making it a promising raw material for sustainable bioethanol production [6,7].

Species of the genus *Artemisia* are widely distributed in the natural flora of Uzbekistan and are well adapted to arid and semi-arid environmental conditions. Their tolerance to unfavorable climatic factors and availability as indigenous plant biomass make them a potentially valuable local feedstock for biofuel production [8,9]. The lignocellulosic composition of *Artemisia* biomass further increases its potential for conversion into fermentable sugars and, subsequently, bioethanol.

Despite this potential, the available scientific information concerning the technological stages of bioethanol production from *Artemisia* biomass—including pretreatment, hydrolysis, and fermentation conditions, as well as the factors affecting bioethanol yield—has not yet been sufficiently systematized. Therefore, a comprehensive analysis of the available scientific literature is scientifically relevant for assessing the suitability of *Artemisia* biomass as a feedstock for bioethanol production and for identifying the technological parameters that determine process efficiency.

The aim of this study is to evaluate the potential of indigenous *Artemisia* biomass for bioethanol production through a comprehensive analysis of the available scientific literature. Particular attention is given to the principal technological stages of the production process, including biomass pretreatment, hydrolysis, and fermentation, as well as to the key factors influencing bioethanol yield, with specific emphasis on fermentation temperature. In addition, the study examines the prospects of utilizing locally available *Artemisia* biomass as a sustainable lignocellulosic feedstock for biofuel production in Uzbekistan and identifies potential directions for further research aimed at improving process efficiency and facilitating its practical implementation.

Methods and Materials. This study is devoted to the analysis of the technological stages involved in bioethanol production from indigenous *Artemisia* biomass based on a comprehensive review of the scientific literature. A systematic

literature review, comparative analysis, data synthesis, and graphical data evaluation methods were employed.

Artemisia diffusa, which is widely distributed in the natural rangelands of Uzbekistan, was selected as the study feedstock. The biomass was harvested in July, air-dried under natural conditions for two weeks, and then ground to a particle size of 0.5 mm. The biomass preparation procedure is presented in Fig.1. (a) fresh biomass, b) air-dried biomass, c) ground biomass.

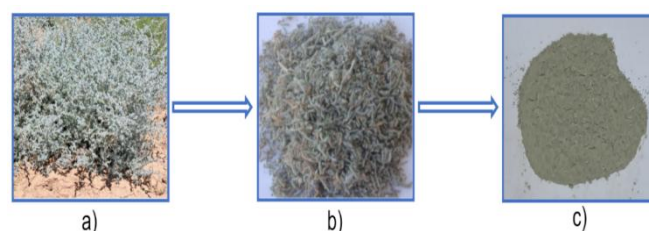


Fig.1. Collection and drying of *Artemisia* biomass sample.

The main stages of bioethanol production, including pretreatment, hydrolysis, and fermentation, were analyzed based on the available scientific literature. During the hydrolysis stage, the applicability of dilute sulfuric acid (H_2SO_4) and alkaline solutions for the disruption of the lignocellulosic structure was evaluated. In the fermentation stage, the advantages of using *Saccharomyces cerevisiae* as the fermenting microorganism were assessed, and the characteristics of the Separate Hydrolysis and Fermentation (SHF) process were comparatively analyzed.

The effect of fermentation temperature on bioethanol yield was evaluated based on the graphical data presented in the reviewed literature.

Results and Discussion. The analysis of the scientific literature revealed that the cellulose and hemicellulose fractions of *Artemisia diffusa* biomass constitute important carbohydrate sources for bioethanol production. The widespread distribution of this species in the arid regions of Uzbekistan highlights its potential as a promising indigenous feedstock for sustainable biofuel production.

The analysis further demonstrated that the efficiency of bioethanol production is strongly influenced by biomass composition, pretreatment

method, hydrolysis conditions, and fermentation parameters. The Separate Hydrolysis and Fermentation (SHF) process was identified as one of the most effective approaches because it allows the hydrolysis and fermentation stages to be carried out independently, thereby enabling the optimization of temperature and pH conditions for each process.

The effect of fermentation temperature on bioethanol yield was analyzed based on the data presented in Fig. 2.

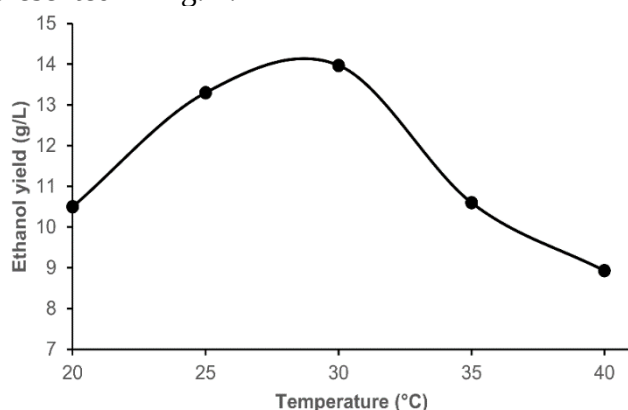


Fig.2. Effect of fermentation temperature on bioethanol yield.

As shown in Fig.2, increasing the fermentation temperature from 20°C to 30°C resulted in an increase in bioethanol yield from 10.5 g/L to 14.0 g/L. However, a further increase in temperature to 35–40°C led to a decline in bioethanol yield. This reduction can be attributed to the decreased metabolic activity of *Saccharomyces cerevisiae* cells at elevated temperatures.

The findings indicate that *Artemisia diffusa* biomass is a promising lignocellulosic feedstock for bioethanol production. Nevertheless, further improvements in bioethanol yield require the optimization of biomass pretreatment methods, hydrolysis conditions, and fermentation parameters. Comprehensive experimental investigations are also needed to enhance process efficiency and support the practical application of *Artemisia* biomass for sustainable biofuel production.

Conclusion. Based on the analysis of the scientific literature and graphical data, *Artemisia diffusa* biomass was identified as a promising indigenous lignocellulosic feedstock for bioethanol production.

The analysis demonstrated that fermentation temperature has a significant influence on bioethanol yield. According to the evaluated data, 30 °C was identified as the optimum fermentation temperature for maximizing bioethanol production.

The Separate Hydrolysis and Fermentation process was found to have considerable potential for improving the efficiency of bioethanol production.

Future research should focus on the experimental validation of bioethanol production from indigenous *Artemisia* biomass under practical operating conditions, as well as on optimizing hydrolysis and fermentation parameters and developing strategies for the large-scale implementation of the technology.

REFERENCES

- [1] International Energy Agency. (2024). Renewables 2023: Transport biofuels.
- [2] Yusoff, M. N. A. M., Zulkifli, N. W. M., Masum, B. M., & Masjuki, H. H. (2015). Feasibility of bioethanol and biobutanol as transportation fuel in spark-ignition engine: A review. *RSC Advances*, 5, 100184–100211.
- [3] International Energy Agency. (2022). Uzbekistan 2022 energy policy review. OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/uzbekistan-2022-energy-policy-review_be7a357c-en.html
- [4] Balat, M. (2011). Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 858–875. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>
- [5] Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578–597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>

- [6] Sarkar, N., Ghosh, S. K., Banerjee, S., & Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, 37(1), 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>
- [7] Zabed, H., Sahu, J. N., Suely, A., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2017). Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 475–501. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>
- [8] Kapustina, L. A., Torrell, M., & Vallès, J. (2001). *Artemisia communities in arid zones of Uzbekistan (Central Asia)*. In E. D. McArthur & D. J. Fairbanks (Eds.), *Shrubland ecosystem genetics and biodiversity: Proceedings* (pp. 104–112). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- [9] O'rinboyev, I. Y., Zhao, P., Mamaraximov, O. M., & G'afforov, Y. S. (2024). O'zbekistonda shuvoq (*Artemisia L.*)ning dorivor turlarida parazitlik qiluvchi Puccinia turlari. *Scientific Bulletin. Series of Biological Research*, 4(80).

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Madarova, S. U. (2026). Production of bioethanol from indigenous *Artemisia* biomass. *Digital Technologies in Industry*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.43>

УДК: 621.391

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.44

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

НАСТРОЙКА ВЕЙВЛЕТНОГО ПОРОГА С ОГРАНИЧЕНИЕМ ПОТЕРИ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНОГО ВЫБРОСА ГАЗОВ



Давронбеков Дилмурод Абдужалилович

Доктор технических наук (DSc), профессор, Ташкентский
университет информационных технологий имени Мухаммада
ал-Хорезмий, Ташкент, Узбекистан
E-mail: d.davronbekov@tuit.uz
ORCID ID: 0000-0003-1193-7918
Science ID: DFC-0525-0001



Писецкий Юрий Валерьевич

Доктор технических наук (DSc), профессор, Ташкентский
университет информационных технологий имени Мухаммада
ал-Хорезмий, Ташкент, Узбекистан
E-mail: yuriy.pisetskiy@mail.ru
ORCID ID: 0009-0003-6473-6121
Science ID: DTN-0525-0007

Аннотация. Исследована настройка мягкого вейвлетного порога в тракте обработки данных сенсорного узла при явном ограничении потери вероятности обнаружения кратковременного выброса. Порог задавался произведением универсального значения и безразмерного множителя, изменявшегося от 0 до 1,05. Расчёт выполнен для четырёхуровневого преобразования Хаара. Восстановление кусочно-гладкого сигнала длиной 512 отсчётов оценивалось по 3000 реализациям аддитивного гауссовского шума при входном отношении сигнал/шум 0 дБ. Событийные свойства проверялись методом Монте-Карло для блоков из 128 отсчётов, трёх форм импульса и вероятности ложной тревоги 0,01; для каждой точки использовано 50 000 реализаций. При множителе 0,30 выходное отношение сигнал/шум составило 7,242 дБ, а средняя доля ненулевых коэффициентов - 33,512 %. В наиболее неблагоприятном случае, соответствующем короткому импульсу при -12 дБ, вероятность обнаружения уменьшилась с 0,6877 до 0,6109. По условию допустимого снижения не более 0,08 выбран множитель 0,30; следующий уровень 0,45 нарушил ограничение. Полученная настройка предназначена для совместного проектирования шумоподавления и детектора и требует последующей проверки на натурных данных конкретного газоаналитического канала.

Ключевые слова: вейвлетное шумоподавление, мягкое порогование, оценка дисперсии, коэффициент разреженности, отношение сигнал/шум, нормированная ошибка, вероятность ложной тревоги, импульсный отклик, обнаружение изменений, метод Монте-Карло, газоаналитический канал, малоресурсная обработка.

Received: 05.09.2026

Accepted: 25.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

XAVFLI GAZ CHIQISHINI ANIQLASH EHTIMOLI YO‘QOTILISHINI CHEKLAGAN HOLDA VEYVLET CHEGARASINI SOZLASH

Davronbekov Dilmurod Abdujalilovich

Texnika fanlari doktori (DSc), professor, Muhammad al-Xorazmiy
nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti, Toshkent,
O‘zbekiston

Pisetskiy Yuriy Valerevich

Texnika fanlari doktori (DSc), professor, Muhammad al-Xorazmiy
nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti, Toshkent,
O‘zbekiston

Annotatsiya. Sensor tugunining ma'lumotlarni qayta ishlash traktida qisqa muddatli keskin chiqindini aniqlash ehtimoli yo'qotilishiga aniq cheklov qo'yilgan holda yumshoq veyvlet chegarasini sozlash tadqiq qilindi. Chegara universal qiymat va 0 dan 1,05 gacha o'zgaruvchi o'lchovsiz ko'paytiruvchining ko'paytmasi sifatida belgilandi. Hisoblash Xaarning to'rt darajali o'zgartirishi uchun bajarildi. Uzunligi 512 ta hisobdan iborat bo'lak-silliqliq signalni tiklash kirishdagi signal/shovqin nisbati 0 dB bo'lgan qo'shiluvchi Gauss shovqinining 3000 ta realizatsiyasi bo'yicha baholandi. Voqeaviy xususiyatlar 128 ta hisobdan iborat bloklar, impulsning uchta shakli va 0,01 soxta signal ehtimoli uchun Monte-Karlo usulida tekshirildi; har bir nuqta uchun 50 000 ta realizatsiyadan foydalanildi. 0,30 ko'paytiruvchida chiqishdagi signal/shovqin nisbati 7,242 dB ni, nolga teng bo'lmagan koeffitsiyentlarning o'rtacha ulushi esa 33,512% ni tashkil etdi. -12 dB dagi qisqa impulska mos keluvchi eng noqulay holatda aniqlash ehtimoli 0,6877 dan 0,6109 gacha kamaydi. 0,08 dan oshmaydigan yo'l qo'yiladigan pasayish shartiga ko'ra 0,30 ko'paytiruvchi tanlandi; 0,45 ga teng keyingi daraja cheklovni buzdi. Olingan sozlama shovqinni bostirish va detektorni birgalikda loyihalash uchun mo'ljallangan bo'lib, muayyan gaz tahlili kanalining real ma'lumotlarida keyinchalik tekshirilishi kerak.

Kalit so'zlar: veyvlet shovqinni bostirish, yumshoq chegaralash, dispersiyani baholash, siyraklik koeffitsiyenti, signal/shovqin nisbati, normallashtirilgan xato, soxta signal ehtimoli, impuls javobi, o'zgarishlarni aniqlash, Monte-Karlo usuli, gaz-analitik kanal, kam resursli qayta ishlash.

WAVELET-THRESHOLD TUNING WITH A CONSTRAINT ON HAZARDOUS-EMISSION GAS DETECTION-PROBABILITY LOSS

Davronbekov Dilmurod Abdujalilovich

Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor, Tashkent
University of Information Technologies named after Muhammad
al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

Pisetskiy Yuriy Valerevich

Doctor of Technical Sciences (DSc), Professor, Tashkent
University of Information Technologies named after Muhammad
al-Khwarizmi, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. Soft wavelet-threshold tuning is studied for a sensor-node data-processing path under an explicit constraint on the loss of short hazardous-emission event detection probability. The threshold is defined as the product of the universal value and a dimensionless multiplier ranging from 0 to 1.05. A four-level Haar transform is used. Reconstruction of a 512-sample piecewise-smooth signal is evaluated over 3,000 realizations of additive Gaussian noise at an input signal-to-noise ratio of 0 dB. Event performance is assessed by Monte Carlo simulation for 128-sample blocks, three pulse morphologies, and a false-alarm probability of 0.01; 50,000 realizations are processed at each point. At a multiplier of 0.30, the output signal-to-noise ratio is 7.242 dB and the mean fraction of nonzero coefficients is 33.512%. For the most adverse case, a short pulse at -12 dB, the detection probability decreases from 0.6877 to 0.6109. With the admissible decrease set to 0.08, the multiplier of 0.30 is selected, whereas the next value of 0.45 violates the constraint. The setting supports joint design of denoising and detection and requires subsequent validation using field data from the specific gas-analysis channel.

Keywords: wavelet denoising, soft thresholding, variance estimation, sparsity ratio, signal-to-noise ratio, normalized error, false-alarm probability, pulse response, change detection, Monte Carlo method, gas-analysis channel, resource-constrained processing.

Введение. Газоаналитический канал промышленной системы экологического и технологического контроля формирует временной ряд, в котором полезный отклик сосуществует с дрейфом чувствительности, фоновыми изменениями и шумом измерительной части. Долговременная нестабильность металлооксидных сенсоров подтверждена натурными исследованиями и

открытыми наборами данных [1, 2, 18, 19]. Для распределённых систем существенны сохранение локальных изменений, связанных с появлением контролируемого вещества, ограниченные ресурсы сенсорного узла и достоверная передача тревожного события [3, 4, 17, 20, 21-24].

Литературный анализ и методы. Много-масштабное разложение отделяет медленные

составляющие от локальных деталей [8]. Пороговое оценивание вейвлетных коэффициентов уменьшает дисперсию шума, но одновременно вносит смещение в полезные детали [9]. Значение порога может определяться глобально, по уровням или по локальной статистике коэффициентов [10, 11]. В современных задачах промышленного мониторинга эффективность вейвлетной обработки оценивается не только по SNR и ошибке, но и по сохранению диагностически значимых импульсов [5-7]. Lifting-факторизация и целочисленные варианты преобразования позволяют выполнить эти операции с малой промежуточной памятью [12, 13].

Критерий среднеквадратической ошибки сам по себе не гарантирует сохранения короткого события. Увеличение порога способно улучшать интегральную оценку восстановления и одновременно уменьшать отклик детектора на импульс. Адаптивный выбор представления [14] и методы поиска изменений [15, 16] также используют пороговые решения, однако параметры шумоподавления и событийного блока обычно задаются раздельно.

Целью работы является определение множителя мягкого порога преобразования Хаара по совместным данным о качестве восстановления, разреженности коэффициентов и вероятности обнаружения. Исследуемая процедура отличается от ранжирования нескольких базисов: базис фиксирован, а настраиваемым параметром служит уровень нелинейного сокращения деталей. Рабочая точка выбирается по явному ограничению потери вероятности обнаружения для нескольких форм события.

Результаты. В каждом блоке выполнялось четырёхуровневое ортонормированное преобразование Хаара. Стандартное отклонение шума оценивалось по медиане модулей коэффициентов первого детального уровня. Базовое значение задавалось универсальным порогом, а фактически применяемый порог равнялся $\alpha\lambda_u$, где α - безразмерный множитель из заданной сетки:

$$\lambda_u = \hat{\sigma}\sqrt{2 \ln N}, \quad \hat{\sigma} = \frac{\text{median}_k |d_1[k]|}{0,6745}, \quad (1)$$

где λ_u - универсальный порог;

$\hat{\sigma}$ - оценка стандартного отклонения шума;

N - длина блока, отсчётов;

$d_1[k]$ — коэффициент первого детального уровня;

k - индекс коэффициента;

$\ln$ - натуральный логарифм. В расчётах применялось $\lambda = \alpha\lambda_u$.

Для коэффициентов деталей использовалось мягкое порогование: модуль коэффициента уменьшался на λ , а коэффициенты с модулем не выше λ обнулялись. Коэффициенты аппроксимации не изменялись. Такой порядок сохраняет медленную компоненту и допускает прямой подсчёт доли коэффициентов, которые остаются ненулевыми.

Испытательный сигнал длиной 512 отсчётов включал линейное изменение фона, низкочастотную гармонику и три события разной формы: выброс с быстрым нарастанием и экспоненциальной релаксацией, трапецидальное плато и короткий импульс. К нему добавлялся белый гауссовский шум с входным SNR 0 дБ. Ошибка восстановления вычислялась относительно размаха незашумлённого сигнала.

$$\text{NRMSE} = 100\% \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n] - \hat{x}[n])^2}}{x_{\min \max}}, \quad (2)$$

где N - число отсчётов;

n - номер текущего отсчёта;

$x[n]$ и $\hat{x}[n]$ - соответственно эталонное и восстановленное значения;

$x_{\max}$ и $x_{\min}$ - задают границы размаха эталона. Показатель NRMSE выражен в процентах этого размаха.

Выходное отношение сигнал/шум рассчитывалось по энергии эталонной реализации и энергии ошибки восстановления:

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{n=0}^{N-1} s^2[n]}{\sum_{n=0}^{N-1} (s[n] - \hat{s}[n])^2} \right), \quad (3)$$

где SNR - отношение сигнал/ошибка, дБ;

$s[n]$ - эталонный сигнал;

$\hat{s}[n]$ - оценка после обработки;

n - номер отсчёта;

$\lg$ - десятичный логарифм.

Событийный эксперимент проводился отдельно, чтобы интегральная ошибка восстановления не определяла результат детектора. Эталонные импульсы нормировались к единичной энергии; их амплитуда задавалась требуемым SNR. После пороговой обработки применялся согласованный линейный детектор.

Для каждого α и каждой формы события порог детектора независимо калибровался по фоновым реализациям:

$$P_D = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}}, P_{FA} = \frac{N_{FP}}{N_{FP} + N_{TN}}, \quad (4)$$

где P_D - вероятность обнаружения;

P_{FA} - вероятность ложной тревоги;

N_{TP} - число правильных обнаружений;

N_{FN} - число пропусков;

N_{FP} - число ложных тревог;

N_{TN} - число правильных решений об отсутствии события.

В таблице 1 приведены параметры обоих вычислительных экспериментов. Фиксированные начальные состояния генератора псевдослучайных чисел позволяют повторить выборки и проверить приведённые далее значения.

Таблица 1.

Параметры вычислительного эксперимента

Параметр	Восстановление	Обнаружение
Длина блока	512	128
Число уровней Хаара	4	4
Сетка α	0; 0,15; ...; 1,05	0; 0,15; ...; 1,05
SNR, дБ	0	-12; -9; -6; -3; 0
Число реализаций	3000	80 000 фоновых; 50000 на точку
Условие детектора	-	$P_{FA}=0,01$
Начальные состояния	20260823	20260824-20260826

Параметры таблицы разделяют две задачи: оценка восстановления выполняется на протяжённом составном сигнале, а событийная проверка — на более коротком блоке детектора. За счёт этого вывод о пороге не сводится к одному показателю качества.

Последовательность вычислений показана на рис.1. Обратная связь от детектора к сетке α означает повторную калибровку порога решения при каждом варианте вейвлетного порога.



Рис.1. Контур событийно-согласованной настройки вейвлетного порога.

Схема исключает сравнение вероятностей обнаружения при разных фактических уровнях ложной тревоги. Сначала для каждого α обеспечивается одинаковое P_{FA} , затем оценивается изменение P_D и доли ненулевых

коэффициентов.

Обсуждение. Результаты восстановления сведены в таблице 2. В столбце SNR указаны среднее значение и выборочное стандартное отклонение по 3000 реализациям; доля коэффициентов учитывает неизменяемую аппроксимацию и ненулевые детали.

Таблица 2.

Качество восстановления и доля ненулевых коэффициентов

α	SNR _{вых} , дБ	NRMSE, %	Ненулевые коэффициенты, %
0,00	0,004 ± 0,268	82,962	100,000
0,15	3,621 ± 0,404	54,734	62,346
0,30	7,242 ± 0,693	36,151	33,512
0,45	9,965 ± 0,870	26,471	16,981
0,60	11,250 ± 0,932	22,847	9,640
0,75	11,633 ± 0,962	21,869	7,134
0,90	11,715 ± 0,971	21,668	6,437
1,05	11,728 ± 0,973	21,635	6,282

При $\alpha=0,30$ среднее выходное SNR достигло 7,242 дБ, а ненулевыми остались 33,512% коэффициентов. Дальнейшее увеличение α улучшало интегральные оценки медленнее: между 0,90 и 1,05 прирост SNR составил только 0,014 дБ.

Графическое представление тех же данных на рис.2 показывает область насыщения и положение выбранного значения $\alpha=0,30$.

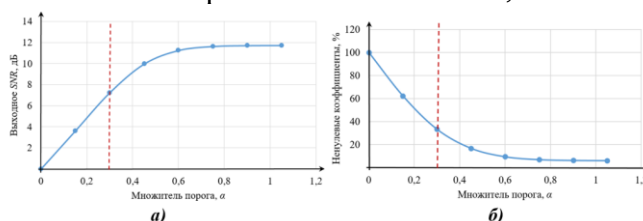


Рис.2. Зависимость качества восстановления (а) и доли коэффициентов (б) от множителя порога.

Рост α до 0,75 резко уменьшает число ненулевых деталей, после чего разреженность почти не изменяется. Такой график не выявляет событийные потери, поэтому окончательный выбор требует отдельной проверки детектора.

В таблице 3 приведены вероятности обнаружения при SNR события -12 дБ для трёх нормированных форм. Все значения получены при индивидуально откалиброванном $P_{FA}=0,01$; максимальная полуширина 95%-го интервала Монте-Карло не превышала 0,0044.

Таблица 3.

Вероятность обнаружения событий разной формы при -12 дБ

α	Короткий импульс	Выброс-релаксация	Плато	Максимальная потеря
0,00	0,6877	0,6952	0,7033	0,0000
0,15	0,6682	0,6783	0,6873	0,0196
0,30	0,6109	0,6385	0,6578	0,0769
0,45	0,5347	0,5930	0,6267	0,1530
0,60	0,4586	0,5612	0,6046	0,2291
0,75	0,4062	0,5454	0,5938	0,2815
0,90	0,3768	0,5374	0,5866	0,3110
1,05	0,3614	0,5336	0,5860	0,3264

Короткий импульс оказался наиболее чувствительным к порогованию: при $\alpha=0,30$ потеря P_D равна 0,0769. Для выброса с релаксацией и плато соответствующие потери составили 0,0566 и 0,0455.

Различие между морфологиями видно на рис.3: после $\alpha=0,30$ кривая короткого импульса убывает заметно быстрее остальных.

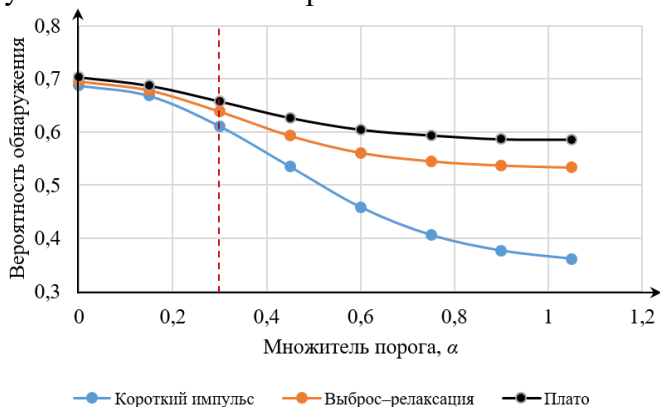


Рис.3. Вероятность обнаружения трёх форм событий при -12 дБ.

Отличие объясняется распределением энергии короткого импульса по детальным коэффициентам: мягкий порог уменьшает именно те компоненты, которые формируют его максимум. У плато большая часть энергии относится к более медленной структуре и ослабляется меньше.

Для проверки выбранной точки в расширенном диапазоне SNR исследован выброс с быстрым нарастанием и релаксацией. Таблица 4 содержит значения без порогования и при $\alpha=0,30$.

Различие сосредоточено в области слабых событий: при -12 дБ оно составляет 0,0561, при -9 дБ — 0,0235, а начиная с -3 дБ в пределах шага моделирования кривые достигают единицы.

Таблица 4.

Вероятность обнаружения выброса с релаксацией

SNR, дБ	$\alpha=0$	$\alpha=0,30$	Разность
-12	0,6960	0,6398	0,0561
-9	0,9570	0,9335	0,0235
-6	0,9996	0,9991	0,0004
-3	1,0000	1,0000	0,0000
0	1,0000	1,0000	0,0000

Кривые на рис.4 подтверждают, что выбранный порог влияет прежде всего на нижнюю часть рабочей характеристики детектора.

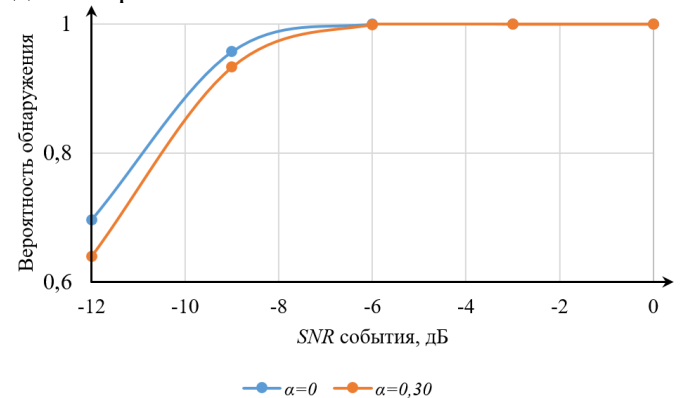


Рис.4. Вероятность обнаружения до ($\alpha=0$) и после ($\alpha=0,30$) пороговой обработки.

При средних и высоких SNR различие практически исчезает, поскольку энергия события существенно превышает порог деталей. Ограничивающим режимом остаётся обнаружение слабых кратковременных сигналов.

Таблица 5.

Выбор рабочей точки пороговой обработки

Показатель	Условие	Результат	Решение
Потеря P_D для каждой формы	$\leq 0,08$	$\alpha=0,30$: 0,0769	Выполнено
Следующий узел сетки	То же	$\alpha=0,45$: 0,1530	Не выполнено
Доля ненулевых коэффициентов	Минимум среди допустимых	33,512%	$\alpha=0,30$
Выходное SNR при входных 0 дБ	Контрольный показатель	$7,242 \pm 0,693$ дБ	$\alpha=0,30$

Рабочая точка определялась без взвешивания разнородных критериев. Сначала вводилось проверяемое условие: для каждой из трёх морфологий при -12 дБ снижение P_D относительно $\alpha=0$ не должно превышать 0,08. Среди вариантов, удовлетворяющих этому условию, выбиралось наибольшее α , поскольку оно обеспечивает меньшую долю ненулевых коэффициентов.

Итог проверки ограничений и показатели выбранной точки представлены в таблице 5.

Граница между $\alpha=0,30$ и $0,45$ оказалась однозначной для принятого ограничения: запас по потере P_D в выбранной точке равен $0,0031$, а на следующем шаге превышение составляет $0,0730$. Уменьшение шага сетки около этой границы может уточнить настройку после получения натуральных данных.

Полученный результат не интерпретируется как универсальная константа для газовых сенсоров. Значение α зависит от частоты дискретизации, импульсной характеристики датчика, спектра помех и структуры детектора. Модель с белым гауссовским шумом не воспроизводит цветной шум, пропуски, насыщение и долговременный дрейф; эти факторы должны быть включены в последующую экспериментальную проверку.

Практическое следствие состоит в изменении порядка настройки программного тракта. Порог шумоподавления нельзя фиксировать только по максимуму выходного SNR . Его следует оценивать совместно с порогом решения детектора на валидационной выборке, содержащей несколько типов опасного события и фоновые режимы конкретного объекта.

Заключение. Предложена процедура настройки мягкого порога преобразования Хаара по ограничению потери вероятности обнаружения. В вычислительном эксперименте значение $\alpha=0,30$ повысило выходное SNR с $0,004$ до $7,242$ дБ и уменьшило среднюю долю ненулевых коэффициентов до $33,512\%$. Для наиболее чувствительной импульсной формы при -12 дБ вероятность обнаружения снизилась с $0,6877$ до $0,6109$, что соответствует принятому пределу $0,08$. Переход к $\alpha=0,45$ нарушил ограничение и потому был исключён, несмотря на дальнейшее улучшение интегральной ошибки восстановления. Результаты подтверждают необходимость совместной калибровки вейвлетного шумоподавления и событийного детектора. Следующий этап работы должен включать оценку порога на записях газовых сенсоров с реальным дрейфом и нестационарными производственными помехами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Sun, Y., & Zheng, Y. (2023). A method of gas sensor drift compensation based on intrinsic characteristics of response curve. Scientific Reports, 13, Article 11971. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39246-8>
- [2] Wörner, J., Eimler, J., & Pein-Hackelbusch, M. (2025). Long-term drift behavior in metal oxide gas sensor arrays: A one-year dataset from an electronic nose. Scientific Data, 12, Article 1628. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05993-8>
- [3] Zhou, M., Wang, S., Li, J., Wei, Z., & Shui, L. (2025). A wireless sensor network-based combustible gas detection system using PSO-DBO-optimized BP neural network. Sensors, 25(10), Article 3151. <https://doi.org/10.3390/s25103151>
- [4] Praveenchandar, J., Vetrithangam, D., Kaliappan, S., Karthick, M., Pegada, N. K., Patil, P. P., Rao, S. G., & Umar, S. (2022). IoT-based harmful toxic gases monitoring and fault detection on the sensor dataset using deep learning techniques. Scientific Programming, 2022, Article 7516328. <https://doi.org/10.1155/2022/7516328>
- [5] Wang, Y., Liu, J., Wang, D., Liu, X., Cao, P., & Hua, K. (2024). Noise reduction method for mine wind speed sensor data based on CEEMDAN-wavelet threshold. Scientific Reports, 14, Article 24869. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75288-2>
- [6] Ni, B., Song, F., Zhao, L., Fu, Z., & Huang, Y. (2024). Wavelet denoising of fiber optic monitoring signals in permafrost regions. Scientific Reports, 14, Article 9085. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59941-4>

- [7] Mallat, S. G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(7), 674–693. <https://doi.org/10.1109/34.192463>
- [8] Donoho, D. L., & Johnstone, I. M. (1994). Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. *Biometrika*, 81(3), 425–455. <https://doi.org/10.1093/biomet/81.3.425>
- [9] Johnstone, I. M., & Silverman, B. W. (2005). Empirical Bayes selection of wavelet thresholds. *The Annals of Statistics*, 33(4), 1700–1752. <https://doi.org/10.1214/009053605000000345>
- [10] Chang, S. G., Yu, B., & Vetterli, M. (2000). Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression. *IEEE Transactions on Image Processing*, 9(9), 1532–1546. <https://doi.org/10.1109/83.862633>
- [11] Sweldens, W. (1998). The lifting scheme: A construction of second generation wavelets. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 29(2), 511–546. <https://doi.org/10.1137/S0036141095289051>
- [12] Calderbank, A. R., Daubechies, I., Sweldens, W., & Yeo, B.-L. (1998). Wavelet transforms that map integers to integers. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 5(3), 332–369. <https://doi.org/10.1006/acha.1997.0238>
- [13] Coifman, R. R., & Wickerhauser, M. V. (1992). Entropy-based algorithms for best basis selection. *IEEE Transactions on Information Theory*, 38(2), 713–718. <https://doi.org/10.1109/18.119732>
- [14] Lavielle, M. (2005). Using penalized contrasts for the change-point problem. *Signal Processing*, 85(8), 1501–1510. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2005.01.012>
- [15] Fryzlewicz, P. (2014). Wild binary segmentation for multiple change-point detection. *The Annals of Statistics*, 42(6), 2243–2281. <https://doi.org/10.1214/14-AOS1245>
- [16] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422. [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
- [17] Hunter, G. W., Akbar, S., Bhansali, S., Daniele, M., Erb, P. D., Johnson, K., Liu, C.-C., Miller, D., Oralkan, O., Hesketh, P. J., Manickam, P., & Vander Wal, R. L. (2020). Editors' choice—Critical review—A critical review of solid state gas sensors. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(3), Article 037570. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab729c>
- [18] Chai, H., Zheng, Z., Liu, K., Xu, J., Wu, K., Luo, Y., Liao, H., Debliquy, M., & Zhang, C. (2022). Stability of metal oxide semiconductor gas sensors: A review. *IEEE Sensors Journal*, 22(6), 5470–5481. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3148264>
- [19] El Barkani, M., Benamar, N., Talei, H., & Bagaa, M. (2024). Gas leakage detection using Tiny Machine Learning. *Electronics*, 13(23), Article 4768. <https://doi.org/10.3390/electronics13234768>
- [20] Yoldoshev, J. F., & Pisetskiy, Y. V. (2025). A model of decision-making based on telecommunication data in emergency monitoring systems. *Muhammad al-Xorazmiy avlodlari*, 3(33), 76–79.
- [21] Pisetskiy, Y. V., Votinov, K. A., & Yuldoshev, J. F. (2026). Особенности промышленных беспроводных сетей управления на основе стандартов WIA и перспективы их развития. *Yangi Renaissance Ilm-Fan Taraqqiyoti*, 1(7), 362–368. <https://phoenixpublication.net/index.php/YRIF/article/view/11350>

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Давронбеков, Д. А. & Писецкий, Ю. В. (2026). Настройка вейвлетного порога с ограничением потери вероятности обнаружения опасного выброса газов. *Цифровые технологии в промышленности*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.44>

UO‘K: 626.823:627.152

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.45

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

GRUNT O‘ZANLI KANALLARDA OQIZIQLAR SARFINI HISOBLASH USULLARINI TAKOMILLASHTIRISH



G‘ayimnazarov Israil Xoliqovich

Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent, Qarshi
davlat texnika universiteti, Qarshi, O‘zbekiston
E-mail: igayimnazarov@gmail.com
ORCID ID: 0009-0000-0680-5174
Science ID: FQD-0226-0016



Toshmurodov Jomurod Jahongir o‘g‘li

Magistrant, Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O‘zbekiston
E-mail: jomurod@gmail.com
ORCID: 0009-0001-1800-9148

Annotatsiya. Mazkur ilmiy maqola grunt o‘zanli kanallarda oqiziqlar sarfini aniqlashning mavjud hisob usullari tahlil qilinib, ularni takomillashtirish yo‘llari ishlab chiqilgan. Tadqiqotda oqim tezligi, suv chuqurligi, gidravlik nishablik hamda grunt zarrachalarining granulometrik tarkibi kabi asosiy omillarning oqiziqlar harakatiga ta’siri o‘rganilgan. Urganish natijalari asosida oqiziqlar sarfini hisoblash uchun empirik bog‘lanishlar aniqlashtirilgan hamda amaliy sharoitlarga moslashtirilgan takliflar berilgan. Taklif etilgan takomillashtirilgan hisob usullari grunt o‘zanli kanallarda cho‘kma va yuvilish jarayonlarini ishonchliroq baholash, kanallarning gidravlik barqarorligini oshirish hamda foydalanish xarajatlarini kamaytirishga xizmat qiladi. Olingan natijalar irrigatsiya va melioratsiya tizimlarida loyiha va hisob ishlarini olib borishda qo‘llash uchun tavsiya etiladi.

Kalit so‘zlar: grunt o‘zanli kanal, oqiziqlar sarfi, gidravlik hisob, cho‘kma jarayoni, empirik bog‘lanishlar, cho‘kma to‘planish, nostatsionar, kritik tezligi, silliq emasligi, rifellar, fraksion tarkib, o‘zan deformatsiyasi.

Received: 07.09.2026

Accepted: 26.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА РАСХОДА НАНОСОВ В КАНАЛАХ С ГРУНТОВЫМ РУСЛОМ

Гайимназаров Исраил Холикович

Доктор философии (PhD) по техническим наукам, доцент,
Каршинский государственный технический университет,
Карши, Узбекистан

Тошмуродов Жомурод Жахонгир угли

Магистрант, Каршинский государственный технический
университет, Карши, Узбекистан

Аннотация. В данной научной статье проведён анализ существующих методов расчёта расхода наносов в каналах с грунтовым руслом и разработаны пути их совершенствования. В исследовании изучено влияние основных факторов, таких как скорость потока, глубина воды, гидравлический уклон и гранулометрический состав грунтовых частиц, на движение наносов. На основе результатов исследования уточнены эмпирические зависимости для расчёта расхода наносов и разработаны рекомендации, адаптированные к практическим условиям. Предложенные усовершенствованные методы расчёта позволяют более надёжно оценивать процессы отложения и размыва в каналах с грунтовым руслом, повышать гидравлическую устойчивость каналов и снижать эксплуатационные затраты. Полученные результаты реко-

мендуется использовать при выполнении проектных и расчётных работ в ирригационных и мелиоративных системах.

Ключевые слова: канал с грунтовым руслом, расход наносов, гидравлический расчёт, процесс отложения наносов, эмпирические зависимости, накопление наносов, нестационарный поток, критическая скорость, шероховатость, донные рифели, фракционный состав, деформация русла.

IMPROVEMENT OF METHODS FOR CALCULATING SEDIMENT DISCHARGE IN ALLUVIAL CHANNELS

Gaimnazarov Israil Kholikovich

PhD in Technical Sciences, Docent, Karshi State Technical
University, Karshi, Uzbekistan

Toshmurodov Jomurod Jahongir ugli

Master's student, Karshi State Technical University, Karshi,
Uzbekistan

Abstract. This scientific article presents an analysis of existing methods for calculating sediment discharge in channels with erodible soil beds and develops approaches for their improvement. The study investigates the influence of key factors, including flow velocity, water depth, hydraulic slope, and the grain-size distribution of soil particles, on sediment transport. Based on the research findings, empirical relationships for estimating sediment discharge were refined, and recommendations adapted to practical field conditions were developed. The proposed improved calculation methods enable more reliable assessment of sediment deposition and erosion processes in channels with erodible beds, enhance channel hydraulic stability, and reduce operational costs. The obtained results are recommended for use in the design and hydraulic calculation of irrigation and land-reclamation systems.

Keywords: channel with an erodible bed, sediment discharge, hydraulic calculation, sediment deposition process, empirical relationships, sediment accumulation, unsteady flow, critical velocity, bed roughness, bedforms (ripples), grain-size distribution, channel deformation.

Kirish. Hozirgi kunda irrigatsiya va melioratsiya tizimlarining samarali ishlashi grunt o'zanli kanallarning gidravlik holati va ularning barqarorligiga bevosita bog'liqdir. Bunday kanallarda suv oqimi bilan birga oqiziqlarning harakati o'zan shaklining o'zgarishi, cho'kma to'planishi va yuvilish jarayonlarining kuchayishiga olib keladi. Natijada kanallarning suv o'tkazuvchanlik qobiliyati pasayadi, foydalanish xarajatlari ortadi hamda gidrotexnik inshootlarning ishonchiligi kamayadi. Grunt o'zanli kanallarda oqiziqlar sarfini aniq hisoblash o'zan deformatsiyalarini bashorat qilish, kanal kesimini optimal loyihalash va foydalanish jarayonlarini to'g'ri tashkil etishda muhim ahamiyat kasb etadi. Amaliyotda qo'llanilayotgan mavjud hisob usullari asosan empirik bog'lanishlarga asoslangan bo'lib, ular ko'pincha mahalliy tabiiy sharoitlar, gruntning granulometrik tarkibi, oqimning notekisligi hamda nostatsionar gidravlik rejimlarni yetarli darajada hisobga olmaydi. Bu esa hisob natijalarining aniqligiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. So'nggi yillarda grunt o'zanli kanallarda oqiziqlar harakatini tadqiq

etish bo'yicha qator ilmiy izlanishlar olib borilgan bo'lsada, ularning natijalari ko'p hollarda laboratoriya sharoitlari bilan cheklanib qolgan yoki amaliy qo'llash uchun yetarli darajada moslashtirilmagan. Shu sababli, haqiqiy foydalanish sharoitlarini inobatga olgan holda oqiziqlar sarfini hisoblash usullarini takomillashtirish dolzarb ilmiy-amaliy masala bo'lib qolmoqda.

Ushbu maqolaning maqsadi grunt o'zanli kanallarda oqiziqlar sarfini aniqlashda qo'llanilayotgan mavjud hisob usullarini tahlil qilish, ularning kamchiliklarini aniqlash hamda gidravlik va fizik omillarni kompleks hisobga oluvchi takomillashtirilgan hisob yondashuvlarini ishlab chiqishdan iboratdir. Tadqiqot natijalari grunt o'zanli kanallarning barqarorligini oshirish, cho'kma jarayonlarini kamaytirish va suv resurslaridan samarali foydalanishga xizmat qiladi. Grunt o'zanli kanallarda oqiziqlar harakati va ularning sarfini hisoblash masalalari gidravlika va o'zan jarayonlari nazariyasining muhim yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Ushbu

yo'nalishda olib borilgan ilmiy tadqiqotlar asosan oqiziqqlarning paydo bo'lish sharoitlari, ularning harakat mexanizmi hamda o'zan deformatsiyalari bilan bog'liq qonuniyatlarni aniqlashga qaratilgan. Kiyingi tadqiqotlarda oqiziqqlar sarfini aniqlash masalasi suv oqimining kritik tezligi va grunt zarrachalarining o'lchami bilan bog'liq holda ko'rib chiqilgan. Ko'pgina ishlarda oqiziqqlar harakati boshlanishi gidravlik kesuvchi kuch va gruntning qarshilik xossalari orqali izohlangan bo'lib, bu yondashuvlar asosan soddalashtirilgan va ideal sharoitlar uchun mos hisoblangan. Ushbu nazariyalar grunt o'zanli kanallarda o'zan tubi yuvilishi va cho'kma hosil bo'lishini sifat jihatdan baholash imkonini bergan.

Grunt o'zanli kanallarda oqiziqqlar sarfini hisoblash usullarini takomillashtirish bo'yicha S.T. Altunin, V.S. Altunin, V.S. Borovkov, K.V. Grishanin, V.K. Debolskiy, Y.A. Ibadzade, I.G. Kantardji, I.F. Karasev, V.S. Knoroz, Z.D. Kopaliani, Y.M. Kuzminov, E.I. Mass, I.I. Levi, B.F. Snishenko, E.K. Rabkova, N.S. Znamenskaya, P. Akkers, L. Van-Rayn, J.D. Jonson, J. Kennedy, H. Eynshteyn, R. Engelund, A.H. Abalyans, Julien, P. Y. Einstein, H. Graf, W. H. Yalin, M. S. Chow, V. T, Yang, C. T, Q.Sh. Latipov, H.A. Ismagilov, A.M. Muxamedov, R.M. Karimov, M.R. Bakiyev, E.J. Maxmudov, A.M. Arifjanov, D.R. Bazarov, S.S. Eshev, T. Majidov va boshqa olimlar tomonidan ko'plab nazariy, laboratoriya va dala sharoitlarida tadqiqotlar olib borilgan. Ushbu ishlar deformatsiyalangan o'zan tubida gryadalar hosil bo'lishi, ularning harakati va oqiziqqlarning tashilishi jarayonini batafsil tahlil qilishga imkon yaratadi. [1-12;13;14;1516,17,18]

Keyingi bosqichdagi ilmiy izlanishlarda oqiziqqlar sarfini aniqlash uchun empirik va yarim empirik formulalar ishlab chiqilgan. Bu formulalarda suv sarfi, oqim tezligi, gidravlik nishablik, gruntning granulometrik tarkibi hamda o'zan silliq emasligi kabi omillar hisobga olingan. Biroq mazkur bog'lanishlar ma'lum laboratoriya sharoitlari yoki cheklangan dala kuzatuvlari asosida olingan bo'lib, ularning universal qo'llanilishi har doim ham yetarli aniqlikni ta'minlamaydi. So'nggi yillarda grunt o'zanli kanallarda oqiziqqlar harakatini o'rganishda kompleks yondashuvlar rivojlanmoqda. Tadqiqotlarda oqimning nostatsionar rejimi, suv sathining o'zgaruvchanligi, oqiziqqlarning fraksion

tarkibi va o'zan tubida shakllanuvchi rifellar hamda gryadalar ta'siri hisobga olinmoqda. Muallif tomonidan oqiziqqlar sarfi bilan o'zan deformatsiyalari o'rtasidagi bog'liqlikni ifodalovchi takomillashtirilgan matematik modellar taklif etilgan. Muallifning tadqiqot ishlarida grunt o'zanli irrigatsiya kanallarining ekspluatatsiya sharoitlariga alohida e'tibor qaratilgan. Ushbu ishlarda cho'kma jarayonlarining kanallarni suv o'tkazuvchanligiga ta'siri, o'zan tubi shakllarining rivojlanishi hamda oqiziqqlar sarfining mavsumiy o'zgarishi masalalari yoritilgan. Shu bilan birga, mavjud hisob usullarining hududiy sharoitlarga moslashtirilishi zarurligi ta'kidlangan.

Adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, grunt o'zanli kanallarda oqiziqqlar sarfini hisoblash bo'yicha ishlab chiqilgan usullar muayyan sharoitlarda qoniqarli natija bersada, haqiqiy foydalanish sharoitlarida ularning aniqligi yetarli darajada yuqori emas. Ayniqsa, gruntning notekis tarkibi, oqimning o'zgaruvchan rejimi va o'zan tubi shakllarining rivojlanishi kabi omillar ko'pincha to'liq hisobga olinmaydi. Shu sababli, mavjud ilmiy ishlarga tayangan holda oqiziqqlar sarfini aniqlashning takomillashtirilgan, amaliyotga yo'naltirilgan hisob usullarini ishlab chiqish dolzarb vazifa bo'lib qolmoqda. [1-15;]

Metodologiya. Ushbu maqolada grunt o'zanli kanallarda oqiziqqlar sarfini hisoblash usullarini takomillashtirishga qaratilgan bo'lib, nazariy tahlil natijalarini umumlashtirish hamda kuzatuvlari asosida olib borildi. Tadqiqot jarayonida oqimning gidravlik parametrlari, gruntning fizik-mexanik xususiyatlari va o'zan tubida yuzaga keluvchi deformatsiya jarayonlari kompleks tarzda o'rganildi. Oqimning asosiy gidravlik parametrlari, grunt o'zanli kanalda suv oqimining harakatini tavsiflash uchun o'rtacha tezlik ϑ suv chuqurligi h kanal nishabligi i va gidravlik radius R qabul qilindi. Oqim tezligi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi: [1;2;16;17;]

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

bu yerda n — Manning koeffitsiyenti.

Kanal kesimi orqali o'tayotgan suv sarfi:

$$Q = \vartheta \cdot A \quad (2)$$

bu yerda A — suv bilan to'ldirilgan ko'ndalang kesim yuzasi.

Oqiziqqlar harakatining boshlanish sharti

oqiziqqlar harakatining boshlanishi o'zan tubidagi kesuvchi kuch τ orqali baholandi:

$$\tau = \rho g R i \quad (3)$$

bu yerda ρ — suv zichligi, g — erkin tushish tezlanishi.

Oqiziqqlar harakati boshlanishi sharti quyidagi tengsizlik bilan ifodalanadi:

$$\tau \geq \tau_{kr} \quad (4)$$

bu yerda τ_{kr} — grunt zarrachalari uchun kritik kesuvchi kuch bo'lib, u zarracha diametri d va zichligiga bog'liq.

Oqiziqqlar sarfini aniqlash tub oqiziqqlari sarfini aniqlashda o'rtacha zarracha diametri d_{50} va o'zan tubidagi kesuvchi kuchdan foydalanildi. Tadqiqot doirasida oqiziqqlar sarfi quyidagi umumlashtirilgan bog'lanish orqali ifodalandi:

$$q_s = k \left(\frac{\tau - \tau_{kr}}{\tau_{kr}} \right)^m \cdot \sqrt{(s-1)gd^3}_{50} \quad (5)$$

bu yerda;

q_s — bir metr kenglikka to'g'ri keluvchi oqiziqqlar sarfi,

k — empirik koeffitsiyentlar,

s — grunt zarrachalarining nisbiy zichligi.

τ — o'zan tubidagi haqiqiy kesuvchi kuch,

Pa;

τ_{kr} — kritik kesuvchi kuch, Pa;

Kanal bo'yicha umumiy oqiziqqlar sarfi quyidagicha aniqlanadi:

$$Q_s = q_s \cdot B \quad (6)$$

bu yerda B — kanal tubining o'rtacha kengligi.

Takomillashtirilgan hisob yondashuvi tadqiqotda oqimning nostatsionar rejimi va o'zan tubida shakllanuvchi rifellar ta'sirini hisobga olish maqsadida tuzatish koeffitsiyenti φ kiritildi:

$$Q_s^* = \varphi \cdot Q_s \quad (7)$$

bu yerda φ quyidagi omillarga bog'liq deb qabul qilindi:

$$\varphi = f(F_r, d_{90}, \Delta h) \quad (8)$$

bu yerda

F_r — Froude soni,

d_{90} — granulometrik notekislik ko'rsatkichi,

Δh — suv sathi tebranishi.

Taklif etilgan hisob usullarining aniqligi hisoblangan va kuzatilgan oqiziqqlar sarflari o'rtasidagi nisbiy xatolik orqali baholandi:

$$\varepsilon = \frac{|Q_{s,hisob} - Q_{s,amal}|}{Q_{s,amal}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Olingan natijalar asosida mavjud va

takomillashtirilgan hisob usullari solishtirilib, ularning amaliy qo'llanish imkoniyatlari tahlil qilindi.

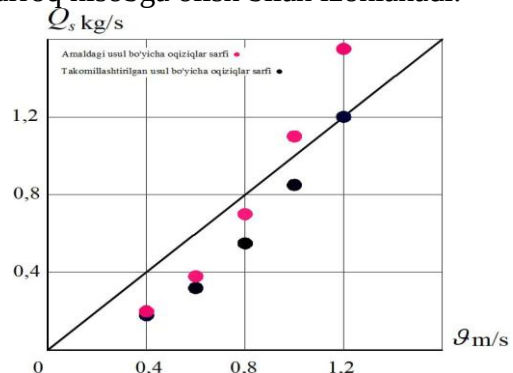
Natijalar. Olingan natijalarini baholash maqsadida grunt o'zanli kanalda oqim tezligining o'zgarishi bilan oqiziqqlar sarfining miqdoriy bog'liqligi aniqlandi. Hisoblashlar mavjud (an'anaviy) va takomillashtirilgan hisob usullari asosida amalga oshirilib, ularning natijalari o'zaro solishtirildi.

1-jadval

Oqim tezligiga bog'liq holda oqiziqqlar sarfining o'zgarishi

Oqim tezligi, ϑ (m/s)	Amaldagi usul bo'yicha oqiziqqlar sarfi, Q_s (kg/s)	Takomillashtirilgan usul bo'yicha oqiziqqlar sarfi, Q_s^* (kg/s)
0,4	0,18	0,20
0,6	0,32	0,38
0,8	0,55	0,70
1,0	0,85	1,10
1,2	1,20	1,55

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, oqim tezligi ortishi bilan oqiziqqlar sarfi har ikkala usulda ham oshib boradi. Biroq takomillashtirilgan hisob usuli bo'yicha aniqlangan qiymatlar an'anaviy usul natijalariga nisbatan yuqoriroq bo'lib, bu holat o'zan tubidagi real deformatsiya jarayonlarini chuqurroq hisobga olish bilan izohlanadi.



1-rasm. Oqiziqqlar sarfini hisoblash usullarining solishtirilishi.

Yuqorida keltirilgan 1-jadval va 1-rasmga ko'rsatilgan $Q_s = f(\vartheta)$ bog'lanish grafik yordamida oqim tezligiga bog'liq holda oqiziqqlar sarfining o'zgarishi ko'rsatilgan. Ryegryession tahlil natijalari qoniqarli ko'ratkichlarni ko'rsatadi (1-rasm).

Regression tahlil natijasida tajriba ma'lumotlari bo'yicha quyidagi tenglama olindi:

$$y = -0.408 + 1.285x$$

$$r \approx 0.987$$

$$R^2 \approx 0.974 \quad (10)$$

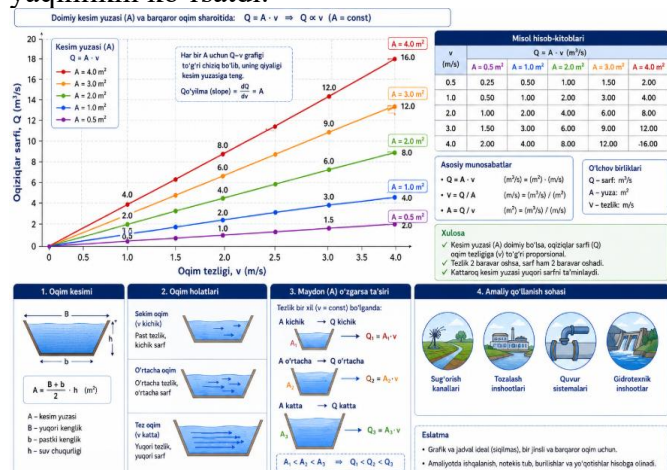
Asosiy regression model quyidagicha ko'rinishga ega bo'ladi.

$$y = -0.56 + 1.70x$$

$$r \approx 0.983$$

$$R^2 \approx 0.966 \quad (11)$$

Regression tahlil natijalari qoniqarli yaqinlikni ko'rsatdi.



2-rasm. Oqim tezligiga bog'liq holda oqiziqqlar sarfini o'zgarishi.

Yuqorida keltirilgan 2-rasmda oqim tezligi va oqiziqqlar sarfi o'rtasidagi bog'lanish aniq ifodalangan. Grafikdan ko'rinadiki, past tezliklarda har ikki usul natijalari o'rtasidagi farq nisbatan kichik bo'lsa, tezlik ortishi bilan bu tafovut sezilarli darajada oshadi. Bu holat yuqori tezliklarda rifellar va gryadalar shakllanishi, shuningdek, grunt zarrachalarining faollashuvi kuchayishi bilan bog'liq. Takomillashtirilgan hisob usulida kiritilgan tuzatish koeffitsiyenti oqimning nostatsionar xususiyatlarini va granulometrik notekislikni hisobga olish imkonini bergan. Natijada, hisoblangan oqiziqqlar sarfi real hisoblashlar sharoitlariga yaqinlashgan hamda cho'kma va yuvilish jarayonlarini ishonchliroq baholash imkoniyati yaratilgan.

Natijalar shuni ko'rsatadiki, taklif etilgan takomillashtirilgan hisob yondashuvi grunt o'zanli kanallarda oqiziqqlar sarfini aniqlashda yuqori aniqlikni ta'minlaydi. Ayniqsa, yuqori tezlikli oqim sharoitlarida mavjud empirik formulalarning cheklanganligi yaqqol namoyon bo'lib, takomillashtirilgan usulning amaliy ustunligi tasdiqlandi. Ushbu yondashuv kanal o'zanining barqarorligini baholash va hisoblash jarayonlarini

optimallashtirishda samarali qo'llanishi mumkin.

Xulosa. Ushbu maqolada grunt o'zanli kanallarda oqiziqqlar sarfini hisoblash masalalari tahlil qilinib, mavjud hisob usullarining imkoniyatlari va cheklanishlari aniqlangan. Olib borilgan nazariy tahlillar hamda hisob natijalari shuni ko'rsatdiki, an'anaviy empirik formulalar ko'p hollarda oqimning nostatsionar rejimi, gruntning granulometrik notekisligi va o'zan tubida shakllanuvchi rifellar ta'sirini to'liq hisobga olmaydi.

Tadqiqot natijasida taklif etilgan takomillashtirilgan hisob usuli oqimning asosiy gidravlik parametrlari bilan bir qatorda, o'zan deformatsiyalari va oqiziqqlar harakatining real sharoitlarini hisobga olish imkonini berdi. Hisoblashlar natijasida takomillashtirilgan yondashuv orqali aniqlangan oqiziqqlar sarfi qiymatlari mavjud usullarga nisbatan yuqori aniqlikka ega ekanligi aniqlandi. Ayniqsa, yuqori tezlikli oqim sharoitlarida hisob natijalari bilan real kuzatuvlar o'rtasidagi tafovut sezilarli darajada kamaydi.

Olingan natijalar grunt o'zanli kanallarning gidravlik barqarorligini baholash, cho'kma va yuvilish jarayonlarini oldindan bashorat qilish hamda kanallarni loyihalash va ekspluatatsiya qilish jarayonlarini optimallashtirishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Takliflar: Grunt o'zanli kanallarni loyihalashda oqiziqqlar sarfini aniqlash uchun takomillashtirilgan hisob usulidan foydalanish tavsiya etiladi, chunki u real hisoblashlar sharoitlarini yaxshiroq aks ettiradi. Kanal ekspluatatsiyasi jarayonida oqim tezligi va suv sathining mavsumiy o'zgarishlarini inobatga olgan holda oqiziqqlar monitoringini tashkil etish maqsadga muvofiq hisoblanadi. Hisob usullarini yanada aniqlashtirish uchun turli granulometrik tarkibga ega gruntlarda keng ko'lamli dala tadqiqotlarini olib borish zarur. Taklif etilgan metodologiyani raqamli model-lashtirish dasturlari bilan uyg'unlashtirish orqali o'zan deformatsiyalarini bashorat qilish aniqligini oshirish mumkin. Tadqiqot natijalaridan irrigatsiya va melioratsiya tizimlarida kanal o'zanining barqarorligini ta'minlash hamda hisoblash xarajatlarini kamaytirish bo'yicha me'yoriy hujjatlarni takomillashtirishda foydalanish tavsiya etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Altunin, V. I. (1982). O‘zan jarayonlari va oqiziqlar harakati nazariyasi. Gidrometeoizdat.
- [2] Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. IAHR.
- [3] Engelund, F., & Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Technical University of Denmark.
- [4] Bagnold, R. A. (1966). An approach to the sediment transport problem from general physics. U.S. Geological Survey.
- [5] Vanoni, V. A. (1975). Sedimentation engineering. American Society of Civil Engineers.
- [6] Julien, P. Y. (2010). Erosion and sedimentation. Cambridge University Press.
- [7] Einstein, H. A. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. U.S. Department of Agriculture.
- [8] Graf, W. H. (1971). Hydraulics of sediment transport. McGraw-Hill.
- [9] Yalin, M. S. (1977). Mechanics of sediment transport. Pergamon Press.
- [10] Abduraxmonov, B. S., & Xudoyberdiyev, J. J. (2015). Grunt o‘zanli kanallarning gidravlik barqarorligi. TIQXMMI.
- [11] Chow, V. T. (1959). Open-channel hydraulics. McGraw-Hill.
- [12] Raudkivi, A. J. (1998). Loose boundary hydraulics. Pergamon Press.
- [13] Parker, G. (1990). Transport of gravel and sediment mixtures. IAHR Monograph.
- [14] Nielsen, P. (2009). Coastal and estuarine sediment dynamics. World Scientific.
- [15] Yang, C. T. (1996). Sediment transport: Theory and practice. McGraw-Hill.
- [16] G‘ayimnazarov, I. X. (2025). Calculation of the parameters of the base rows in a non-stationary flow. Innovatsion texnologiyalar, 59(3), 62–66.
- [17] G‘ayimnazarov, I., Eshev, S., Bazarov, O., Latipov, S., Rakhimov, A., & Guliyeva, S. (2025). Investigation of the initiation of sediment movement in mixed flows. AIP Conference Proceedings, 3256(1), 020041.
- [18] Eshev, S. S., Gayimnazarov, I. X., Latipov, S. A., Rahmatov, M. I., & Kholmamatov, I. K. (2023). Calculation of parameters of subsurface ridges in a steady flow of groundwater channels. AIP Conference Proceedings, 2612(1), 050033.
- [19] G‘ayimnazarov, I. X. (2024). Oqiziqlar harakatining boshlanishini tahlil qilish. Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences, 4(10), 142–147.
- [20] Гайимназаров, И. X. (2024). Натурные исследования по определению расхода наносов в условиях нестационарного течения. Oriental Renaissance: Innovative, Educational, Natural and Social Sciences, 4(4), 317–324.
- [21] G‘ayimnazarov, I. X., Mamarasulov, S. R., & Toshmurodov, J. J. (2026). O‘zan tubi barqarorligini baholash usullari. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(1), 237–241.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

G‘ayimnazarov, I. X., & Toshmurodov, J. J. (2026). Grunt o‘zanli kanallarda oqiziqlar sarfini hisoblash usullarini takomillashtirish. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.45>

SANOATDA RAQAMLI TEXNOLOGIYALAR,
ILMIY-TEXNIK (ELEKTRON) JURNALI E-ISSN: 3030-3214
AXBOROT XATI

“Sanoatda raqamli texnologiyalar” (e-ISSN: 3030-3214)

(<https://portal.issn.org/resource/ISSN/3030-3214>) ilmiy-texnik jurnali ochiq jurnal hisoblanib, mazkur jurnalning vazifasi ilm-fan taraqqiyotining modellashuvi, ta’limning yutuqlari va istiqbollarini, dolzarb muammolari va ularning yechimlarini, shuningdek, ishlab-chiqarish va ta’limning modernizatsiyalashuvi bosqichini yoritib borishdir. “Sanoatda raqamli texnologiyalar” ilmiy-texnik jurnalining maqsadi belgilangan soha mutaxassislar va olimlarning tadqiqotlari va innovatsiyalari to’g’risidagi nashrlarini jamoatchilikka xabardor qilish, yosh avlodning fan va ta’lim sohasidagi qiziqishlarini oshirish va ilmiy konsepsiyalarini bayon etishdir.

Jurnalga: **05.00.00-TEXNIKA FANLARI, 04.00.00-GEOLOGIYA-MINERALOGIYA FANLARI, 02.00.00-KIMYO FANLARI** ixtisosliklari bo’yicha ilmiy maqolalar qabul qilinadi.

Jurnalga maqolalar: **o‘zbek, rus va ingliz** tillarida qabul qilinadi.

“Sanoatda raqamli texnologiyalar” ilmiy-texnik jurnali quyidagi yo‘nalishlar bo’yicha maqolalar qabul qilinadi:

- Kon-metallurgiya va ishlab chiqarish sanoati;
- Geologiya va neft-gaz sanoati;
- Kimyoviy texnologiya va qurilish;
- Yengil sanoat tarmoqlari;
- Ekologiya, mehnat muhofazasi va texnika xavfsizligi.

“Sanoatda raqamli texnologiyalar” ilmiy-texnik jurnaliga chop qilingan har bir maqolaga raqamli identifikator (Digital Object Identifier <https://www.doi.org>) beriladi.

Jurnal quyidagi bazalarga indeksatsiya qilingan:

1. CYBERLENINKA — ilmiy elektron kutubxonasiga (<https://cyberleninka.ru/journal/n/sanoatda-raqamli-texnologiyalar?i=1131974>)
2. eLIBRARY.RU – Ilmiy elektron kutubxonasiga (https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?langid=1&id=81309)
3. ResearchBib – ilmiy elektron kutubxonasiga (<https://journalseeker.researchbib.com/view/issn/3030-3214>)
4. SLIB.UZ – Ilmiy elektron kutubxonasiga (<https://slib.uz/uz/journal/view?id=285>)
5. Har bir maqola Google akademiyasiga indeksatsiya qilinadi (<https://scholar.google.com/citations?user=mzU3-6QAAAAJ&hl=en&authuser=3>)
6. Index Copernicus – ilmiy jurnallar bazasi (<https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=129473>)

Jurnal ta’sischilari:

1. Qarshi davlat texnika universiteti;
2. “Olmaliq kon metallurgiya kombinati” AJ;

“Sanoatda raqamli texnologiyalar” ilmiy-texnik jurnali O‘zbekiston Respublikasi Prezidenti Administratsiyasi huzuridagi Axborot va ommaviy kommunikatsiyalar agentligi tomonidan ro‘yxatga olingan 26.07.2023 yildagi №106679-sonli guvohnoma. Turkum nashrlarning chiqish ma’lumotlarini GOST 7.4-95 “Nashrlar. Chiqish ma’lumotlari” hamda GOST 7.56-2002 «Xalqaro standart turkum raqami» davlatlararo standartlar talablari asosida bo‘lishini to‘liq ta’minlash maqsadida, Alisher Navoiy nomidagi O‘zbekiston Milliy kutubxonasi bilan 2023 yil 12-dekabrda Davriy nashrlarga ISSN xalqaro standart raqami ISSN: 3030-3214 raqam berilgan.

MAQOLALARGA QO'YILGAN TALABLAR

Maqolaning standart hajmi: 4-15 betli matn Word matn muharririda, o'zbek, rus yoki ingliz tilida.

Maqola mualliflari 4 nafardan ko'p bo'lmashligi kerak. Mualliflarning har biri uchun to'liq ma'lumotlar ko'rsatilishi lozim (ish joyi, lavozimi, ilmiy darajasi, ilmiy unvoni, shahar va davlati)

Maqolada shartli ravishda **kirish, Adabiyot tahlili va metodi, tadqiqot natijalari va muhokama, xulosa va takliflar, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan** iborat bo'lishi lozim.

Aannotatsiya, kalit so'zlar Annotatsiya berilgan shakl va ko'rinishda bo'lishi lozim. Iltimos, bu shaklni o'zgartirmang. Annotatsiya 100-250 so'zdan hamda 4-20 kalit so'zlardan iborat bo'lishi lozim. Annotatsiya (ingliz tilida ABSTRACT) va kalit so'zlar (keywords) xalqaro tizimlarda indekslanishi uchun (3 ta tilda) o'zbek, rus va ingliz tilida ham berilishi zarur. Kalit so'zlar 4-20 so'zdan iborat maqoladagi asosiy urg'u olgan atamalarni yozish maqsadga muvofiq.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidagi adabiyotlar oxirgi 10 yil ichidagi adabiyotlar ko'rsatilishi tavsiya etiladi.

O'lchov birliklari va belgilar SI xalqaro birliklar tizimida ko'rsatilishi kerak.

Maqola materiallarining yuqoridagi talablarga mos kelmasligi nashrni rad etish uchun sabab bo'lishi mumkin.

Maqola matniga qo'yilgan talablar:

Sarlavha ko'rinishi: Shrift "Times New Roman", o'lchami 14 pt, bosh harfdan, markazdan, chiziqcha yo'q, qalin. Maqola sarlavhasi tepasida (1.5 intervaldan keyin), o'ng burchakda - mualliflarning ismi va shariflari, odatiy shrift, o'lchami 14 pt; chap burchakda - UO'K indeksi;

Maqola sarlavhasi ostida - mualliflarning ismi va sharifi - qalin shriftda; ish joyi, lavozimi ilmiy unvoni, tashkilot nomi - 10 pt. o'lchamdagi odatiy shriftda va 3x4 rasmi ko'rsatilishi lozim.

Annotatsiya ko'rinishi: "Times New Roman" shriftlar to'plami, 14 pt. o'lchamida, (1 intervaldan).

Kalit so'zlar ko'rinishi: "Times New Roman" shriftlar to'plami, 14 pt. o'lchamda.

Asosiy matnga talablar: Shrift "Times New Roman", 14 pt., qator oralig'i 1, xat boshi - 1 sm, sahifa chekkalari - chap va o'ng - 1.5 sm; yuqori va pastki - 1.5 sm.

Jadval ko'rinishi: Jadval nomi - "Times New Roman", 14 pt oralig'ida, qalin, markazda, jadvaldagi matn - "Times New Roman", 10-14 pt., odatiy.

Formula kiritish talablar: Formulalar va maxsus belgilar faqat «Microsoft Equation-3» muharririda yoziladi. Formulalar chap tomonda joylashtiriladi.

Rasmlarga talablar: Rasmlar aniq ko'ringan bo'lishi kerak, chop etishga tayyor, matnga qo'shilishi va GIF, BMP, JPEG formatida.

Adabiyotlar ro'yxatiga talablar: "Times New Roman", 14 pt o'lchamda, kursiv, 4-30 ta (25% o'z ishlariga havola), oxirgi 10 yilda nashr etilgan adabiyotlar bo'lishi maqsadga muvofiq.

Adabiyotga havola keltirish raqami kvadrat qavs ichida, matnning tegishli joyida beriladi. Adabiyotlarga to'g'ri havola keltirish uchun www.snoska.info saytidan yoki <https://kursach37.com/oformlenie-spiska-literatury-po-gost/> veb resurlaridan foydalanish tavsiya etiladi.

Rasmlar JPEG, TIF, EPS yoki PSD formatlarida yetarlicha kengayishda (tiniqligi) (1:1 masshtabda kamida 300 dpi) alohida grafik fayllar sifatida yozib olinishi lozim.

Bog'lanish uchun ma'lumotlar, Har bir muallifning 3x4 rasmi, mualliflar ismi shariflari (to'liq), ish joyi va lavozimi va elektron pochta manzili, ORCID (orcid.org tomonida ro'yxatdan o'tgan ID raqam ko'rsatish tavsiya etiladi), Science ID (id.ilmiy.uz tomonida ro'yxatdan o'tgan ID raqam ko'rsatish majburiy) va SPIN (elibrary.ru tomonida ro'yxatdan o'tgan ID raqam ko'rsatish tavsiya etiladi) raqamlar va bog'lanish uchun telefon raqamlari kiritilishi shart. **(Maqolaga materialni ochiq matbuotda nashr etilish imkoniyati to'g'risida ekspert xulosasi ilova qilinishi mumkin).**

Izoh: Maqolaning originalligini aniqlangan (antiplagiat) hisoboti taqdim etish shart (originallik darajasi 80 foiz va undan yuqori bo'lganda va yuqoridagi talablarga javob berganda, gramatik xatolar bo'lmaganda maqola qabul qilinadi). Antiplagiatdan o'tkazish manzili: <https://milliyantiplag.uz/>

**ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ,
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ (ЭЛЕКТРОННЫЙ) ЖУРНАЛ E-ISSN: 3030-3214
ИНФОРМАЦИОННОЕ ПИСЬМО**

Научно-технический журнал «Цифровые технологии в промышленности» (e-ISSN: 3030-3214 (<https://portal.issn.org/resource/ISSN/3030-3214>)) является открытым журналом, задачей которого является освещение моделирования прогресса науки, достижений и перспектив образования, актуальных проблем и их решений, а также этапов модернизации производства и образования. Цель научно-технического журнала «Цифровые технологии в промышленности» заключается в информировании специалистов в данной области, публикации исследований и инноваций ученых для общественности, повышении интереса молодого поколения к науке и образованию и изложении научных концепций.

В журнал принимаются научные статьи: **05.00.00-ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ, 04.00.00-ГЕОЛОГИЯ-МИНЕРАЛОГИЯ, 02.00.00-ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ.**

Статьи в журнал принимаются: **узбекском, русском и английском языках.**

Научно-технический журнал «Цифровые технологии в промышленности» принимает статьи по следующим направлениям:

- Горно-металлургическая и обрабатывающая промышленность;
- Геология и нефтегазовая промышленность;
- Химическая технология и строительство;
- Легкая промышленность;
- Экология, охрана труда и техническая безопасность.

Цифровой идентификатор объекта (Digital Object Identifier <https://www.doi.org>) присваивается каждой статье, опубликованной в научно-техническом журнале «Цифровые технологии в промышленности».

Журнал индексируется в следующих базах данных:

1. КИБЕРЛЕНИНКА – научная электронная библиотека
(<https://cyberleninka.ru/journal/n/sanoatda-raqamli-texnologiyalar?i=1131974>)
2. eLIBRARY.RU – научная электронная библиотека
(https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?langid=1&id=81309)
3. ResearchBib – научная электронная библиотека
(<https://journalseeker.researchbib.com/view/issn/3030-3214>)
4. SLIB.UZ – научная электронная библиотека
(<https://slib.uz/uz/journal/view?id=285>)
5. Каждая статья индексируется в Google Academics.
(<https://scholar.google.com/citations?user=mzU3-6QAAAAJ&hl=en&authuser=3>)
6. Index Copernicus – база данных научных журналов
(<https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=129473>)

Учредители журнала:

1. Каршинский государственный технический университет;
2. АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат»;

Научно-технический журнал «Цифровые технологии в промышленности» зарегистрирован Агентством информации и массовых коммуникаций при Администрации Президента Республики Узбекистан, свидетельство №106679 от 26.07.2023. Выходные данные серии публикаций предусмотрены ГОСТ 7.4-95 «Издания. В целях полного обеспечения соответствия «Выходной информации» и ГОСТ 7.56-2002 «Международный стандартный серийный номер» требованиям международных стандартов, 12 декабря 2023 года в Национальной библиотеке Узбекистана имени Алишера Навои был объявлен международный ISSN. Периодическим изданиям присвоен стандартный номер ISSN: 3030-3214.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ

Стандартный размер статьи: Текст объемом 4-15 страниц в текстовом редакторе Word на узбекском, русском или английском языках.

Авторов статьи должно быть не более 4. Необходимо предоставить полную информацию по каждому из авторов (место работы, должность, ученая степень, ученое звание, город и страна).

Статья должна содержать условное **введение, анализ и метод литературы, результаты исследования и их обсуждение, выводы и предложения, а также список использованной литературы.**

Аннотация, ключевые слова Аннотация должна быть в заданной форме и формате. Пожалуйста, не изменяйте эту форму. Аннотация должна состоять из 100-250 слов и 4-20 ключевых слов. Аннотация (ABSTRACT на английском языке) и ключевые слова (keywords) должны быть предоставлены на узбекском, русском и английском языках (на 3-х языках) для индексации в международных системах. Ключевые слова. Термины, получившие основной акцент в статье, желательно писать в объеме 4-20 слов.

Единицы измерения и символы должны быть отображены в Международной системе единиц SI.

Несоответствие материалов статьи указанным требованиям может стать основанием для отказа в публикации.

Требования к тексту статьи:

Просмотр названия: Шрифт — Times New Roman, размер 14 пт, прописной, центрированный, без подчеркивания, жирный. Над названием статьи (через 1,5 интервала) в правом углу — фамилия и инициалы авторов, шрифт стандартный, размер 14 пт; в левом углу — индекс УДК;

Под названием статьи - имя и фамилия авторов – жирным шрифтом; место работы, ученое звание, название организации – 10 пт. должно отображаться шрифтом стандартного размера и изображением 3x4.

Абстрактный вид: Набор шрифтов Times New Roman, 14 пт. в размере, (от 1 интервала).

Просмотр ключевых слов: Набор шрифтов Times New Roman, 14 пт. по размеру.

Требования к основному тексту: Шрифт «Times New Roman», 14 пт., межстрочный интервал 1, шапка – 1 см, поля страницы – левое и правое – 1,5 см; верх и низ – 1,5 см.

Вид таблицы: Название таблицы – «Times New Roman», интервал 14 пт, жирный, по центру, текст таблицы – «Times New Roman», 10–14 пт, обычный.

Требования к вводу формулы: Формулы и специальные символы пишутся только в редакторе «Microsoft Equation-3». Формулы располагаются слева.

Требования к фотографиям: Изображения должны быть четко видны, готовы к печати, содержать текст и иметь формат GIF, BMP, JPEG.

Требования к списку литературы: Times New Roman, 14 пт, курсив, 4-30 (25% ссылки на собственные работы), желательны публикации за последние 10 лет.

Номера ссылок даются в квадратных скобках в соответствующем месте текста. Для корректной ссылки на литературу рекомендуется использовать сайт www.snoska.info или <https://kursach37.com/oformlenie-spiska-literatury-po-gost/>.

Контактная информация: Фотография 3x4 каждого автора, ФИО автора (полностью), место работы и должность, адрес электронной почты, ORCID (рекомендуется указывать идентификационный номер, зарегистрированный на orcid.org), Science ID (обязательно указать ID-номер, зарегистрированный на стороне id.ilmiy.uz) и SPIN (elibrary.ru рекомендуется указывать идентификационный номер). зарегистрированы на стороне) необходимо вводить номера и контактные телефоны. *(К статье может быть приложено экспертное заключение о возможности публикации материала в открытой печати).*

Примечание: Необходимо предоставить отчет, подтверждающий оригинальность статьи (антиплагиат) (статья принимается при уровне оригинальности 80% и выше и соответствии вышеуказанным требованиям, а также отсутствии грамматических ошибок). Адрес антиплагиата: <https://antiplag.uz/>

**DIGITAL TECHNOLOGIES IN INDUSTRY, SCIENTIFIC-TECHNICAL (ELECTRONIC)
JOURNAL E-ISSN: 3030-3214 INFORMATION LETTER**

The scientific and technical journal “Digital Technologies in Industry” (e-ISSN: 3030-3214 (<https://portal.issn.org/resource/ISSN/3030-3214>)) is an open journal whose task is to cover the modeling of scientific progress, achievements and prospects of education, current problems and their solutions, as well as stages of modernization of production and education. The purpose of the scientific and technical journal “Digital Technologies in Industry” is to inform specialists in the field, publish research and innovations of scientists for the public, increase the interest of the younger generation in science and education and present scientific concepts.

The journal accepts scientific articles: **05.00.00-TECHNICAL SCIENCES, 04.00.00-GEOLOGY-MINERALOGY, 02.00.00-CHEMICAL SCIENCES.**

Articles for the journal are accepted: **Uzbek, Russian and English** languages.

The scientific and technical journal “Digital Technologies in Industry” accepts articles in the following areas:

- Mining, metallurgical and manufacturing industries;
- Geology and oil and gas industry;
- Chemical technology and construction;
- Light industry;
- Ecology, labor protection and technical safety.

A Digital Object Identifier (<https://www.doi.org>) is assigned to each article published in the scientific and technical journal “Digital Technologies in Industry”.

The journal is indexed in the following databases:

1. CYBERLENINKA – scientific electronic library
(<https://cyberleninka.ru/journal/n/sanoatda-raqamli-texnologiyalar?i=1131974>)
2. eLIBRARY.RU – scientific electronic library
(https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?langid=1&id=81309)
3. ResearchBib – scientific electronic library
(<https://journalseeker.researchbib.com/view/issn/3030-3214>)
4. SLIB.UZ – scientific electronic library
(<https://slib.uz/uz/journal/view?id=285>)
5. Each article is indexed in Google Academics.
(<https://scholar.google.com/citations?user=mzU3-6QAAAAJ&hl=en&authuser=3>)
6. Index Copernicus – scientific journal database
(<https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=129473>)

The founders of the journal:

- 1. Karshi State Technical University;**
- 2. JSC Almalyk Mining and Metallurgical Combine;**

The scientific and technical journal “Digital Technologies in Industry” is registered by the Agency of Information and Mass Communications under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan, certificate No. 106679 dated July 26, 2023. The output data of the series of publications is provided for by GOST 7.4-95 “Publications. In order to fully ensure compliance of the “Output Information” and GOST 7.56-2002 “International Standard Serial Number” with the requirements of international standards, an international ISSN was announced on December 12, 2023 at the National Library of Uzbekistan named after Alisher Navoi. Periodicals are assigned a standard ISSN number: 3030-3214.

REQUIREMENTS FOR ARTICLES

Standard article size: Text of 4-15 pages in the Word text editor in Uzbek, Russian or English.

There should be no more than 4 authors of the article. It is necessary to provide complete information on each of the authors (place of work, position, academic degree, academic title, city and country).

The article should contain a conventional **introduction, analysis and method of literature, research results and their discussion, conclusions and suggestions, as well as a list of references.**

Abstract, keywords: The abstract must be in the specified form and format. Please do not change this form. The abstract should consist of 100-250 words and 4-20 keywords. Abstract (ABSTRACT in English) and keywords must be provided in Uzbek, Russian and English (in 3 languages) for indexing in international systems. Keywords. It is advisable to write terms that receive the main emphasis in the article in 4-20 words.

Units and symbols must be displayed in the SI International System of Units.

Failure to comply with the specified requirements may be grounds for refusal to publish.

Requirements for the article text:

View title: Font: Times New Roman, size 14 pt, uppercase, centered, no underlining, bold. Above the title of the article (with 1.5 intervals) in the right corner - the surname and initials of the authors, standard font, size 14 pt; in the left corner - UDC index;

Under the title of the article - the name and surname of the authors - in bold; place of work, academic title, name of organization – 10 pt. should be displayed in a standard size font and a 3x4 image.

Abstract view: Font set Times New Roman, 14 pt. in size, (from 1 interval).

View keywords: Font set Times New Roman, 14 pt. to size.

Requirements for the main text: Font “Times New Roman”, 14 pt., line spacing 1, header – 1 cm, page margins – left and right – 1.5 cm; top and bottom – 1.5 cm.

Table view: Table name – “Times New Roman”, spacing 14 pt, bold, centered, table text – “Times New Roman”, 10–14 pt, regular.

Requirements for entering a formula: Formulas and special characters are written only in the Microsoft Equation-3 editor. Formulas are located on the left.

Photo requirements: Images must be clearly visible, print ready, contain text and be in GIF, BMP, JPEG format.

Requirements for the list of references: Times New Roman, 14 pt, italics, 4-30 (25% references to own works), publications within the last 10 years are desirable.

Reference numbers are given in square brackets in the appropriate place in the text. For correct reference to literature, it is recommended to use the website www.snoska.info or <https://kursach37.com/oformlenie-spiska-literatury-po-gost/>.

Contact Information: 3x4 photo of each author, full name of the author, place of work and position, email address, ORCID (it is recommended to indicate the identification number registered on orcid.org), Science ID (indication of the ID number registered on the id.ilmiy.uz side is mandatory) and SPIN (elibrary.ru it is recommended to indicate the identification number). registered externally), you must enter numbers and contact numbers (*An expert opinion on the possibility of publishing the material in the open press may be attached to the article*).

Note: It is necessary to provide a report confirming the originality of the article (anti-plagiarism) (the article is accepted if the originality level is 80% or higher and meets the above requirements, as well as the absence of grammatical errors). Anti-plagiarism address: <https://antiplag.uz/>