



MURAKKAB OLTIN TARKIBLI RUDALARNI ULTRAMAYIN YANCHISH JARAYONI NAZARIY ASOSLARI VA AMALIY AHAMIYATI

Aripov A.¹[0000-0002-0428-507X], Sayfullayev F.²[0009-0005-0641-1956],
Qurbonov M.³[0009-0000-4897-9455], Ikromov A.

¹Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti "Metallurgiya" kafedrası dotsenti, PhD.

²Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti "Metallurgiya" kafedrası doktori

³Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti "Metallurgiya" kafedrası assistenti

⁴Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti "Metallurgiya" kafedrası magistranti

Annotatsiya: Ushbu maqolada murakkab oltin tarkibli rudalarni qayta ishlashda qo'llaniladigan an'anaviy oksidlovchi texnologiyalarga muqobil sifatida ultramayin yanchish usullari bo'yicha adabiyotlar tahlili keltirilgan. Tadqiqotlarda murakkab oltin saqlovchi rudalarning mineralogik xususiyatlari, ayniqsa oltinning sulfid minerallari bilan bog'langan shakllari va ularning metallni ajratib olish jarayoniga ta'siri yoritilgan. Shuningdek, ultramayin yanchish texnologiyasi rudaning struktura holatini o'zgartirishi, oltin zarrachalari yuzasining ochilish darajasini oshirishi hamda keyingi gidrometallurgik qayta ishlash jarayonlarida oltinni ajratib olish samaradorligini yaxshilashi ko'rib chiqilgan. Adabiyotlarda ushbu texnologiyaning iqtisodiy va ekologik afzalliklari Kalgoorlie Consolidated Gold Mines korxonasi faoliyati misolida ham tahlil qilingan. Tahlil natijalari ultramayin yanchish usuli murakkab oltin tarkibli rudalarni qayta ishlashda istiqbolli va samarali muqobil texnologiyalardan biri ekanligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: murakkab oltin tarkibli rudalar, ultramayin yanchish, oksidlovchi qayta ishlash, gidrometallurgiya, oltin ajratib olish, mineralogik tarkib, boyitish jarayoni, texnologik samaradorlik, alternativ usul, yanchilish darajasi.

Аннотация: В данной статье приводится анализ литературы, посвященной методам ультратонкого измельчения как альтернативе традиционным окислительным технологиям, применяемым при переработке упорных золотосодержащих руд. В исследованиях освещаются минералогические особенности упорных золотосодержащих руд, в частности, формы вкрапления золота в сульфидные минералы и их влияние на процесс извлечения металла. Также рассматривается, как технология ультратонкого измельчения изменяет структурное состояние руды, повышает степень вскрытия поверхности частиц золота и улучшает эффективность извлечения золота в последующих процессах гидromеталлургической переработки. В литературе также анализируются экономические и экологические преимущества данной технологии на примере деятельности предприятия Kalgoorlie Consolidated Gold Mines. Результаты анализа показывают, что метод ультратонкого измельчения является одной из перспективных и эффективных альтернативных технологий при переработке упорных золотосодержащих руд.

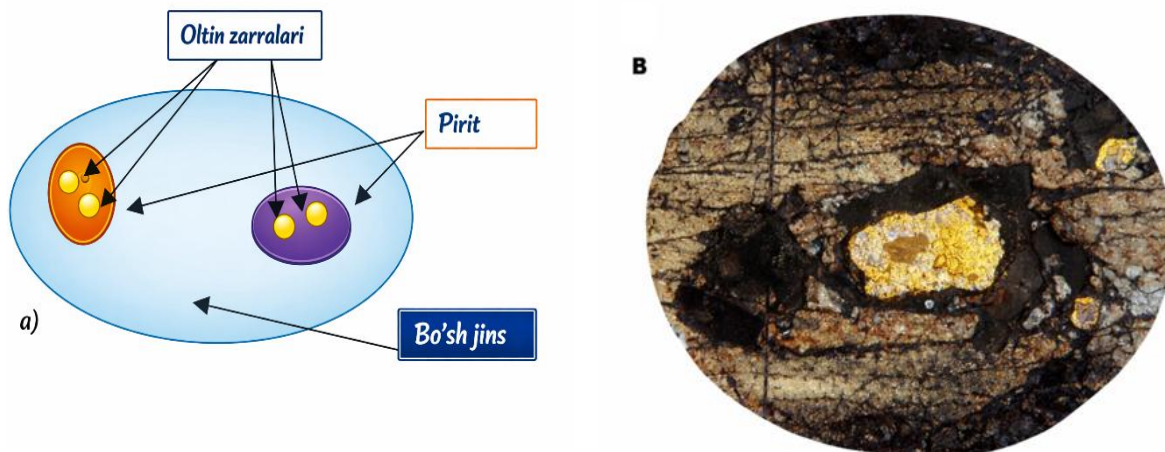
Ключевые слова: упорные золотосодержащие руды, ультратонкое измельчение, окислительная переработка, гидromеталлургия, извлечение золота, минералогический состав, процесс обогащения, технологическая эффективность, альтернативный метод, степень измельчения.

Annotation: This article provides a review of the literature on ultrafine grinding methods as an alternative to the traditional oxidative technologies used in processing refractory gold-bearing ores. The research highlights the mineralogical characteristics of refractory gold ores, particularly the forms of gold inclusions in sulfide minerals and their impact on the metal extraction process. The article also examines how ultrafine grinding technology alters the ore's structural state, increases the surface exposure of gold particles, and improves gold recovery efficiency in subsequent hydrometallurgical processing. Furthermore, the literature analyzes the economic and environmental advantages of this technology, using the operations of Kalgoorlie Consolidated Gold Mines as a case study. The results of the analysis indicate that ultrafine grinding is a promising and effective alternative technology for processing refractory gold-bearing ores.

Keywords: refractory gold ores, ultrafine grinding, oxidative processing, hydrometallurgy, gold recovery, mineralogical composition, beneficiation process, technological efficiency, alternative method, degree of grinding.

Kirish

Adabiyotlarda qayd etilishicha, qiyin boyitiladigan oltin rudalarining asosiy xususiyatlaridan biri oltinning pirit va boshqa sulfidli minerallar tarkibida mayda dispers holatda uchrashidir. An'anaviy yanchish jarayonlarida rudani ma'lum yiriklikkacha yanchish piritni bo'sh tog' jinslaridan ajratish imkonini beradi hamda flotatsiya jarayonlari orqali kam massali sulfidli konsentrat olishga erishiladi. Biroq, olingan konsentratni to'g'ridan-to'g'ri sianlash orqali qayta ishlash ko'pincha oltinni ajratib olish darajasining past bo'lishiga sabab bo'ladi. Bu holat sianli eritmaning pirit kristall panjarasi ichida qamalib qolgan yoki sulfid minerallari bilan mustahkam bog'langan oltin zarrachalari bilan yetarli darajada o'zaro ta'sirlasha olmasligi bilan izohlanadi (1a, b-rasm) [7].



1a,b-rasm. Ruda tarkibidagi oltin zarrasi sulfid minerali (pirit) bilan butunlay o'ralgan ko'rinishi.

Tadqiqotlar davomida murakkab oltin tarkibli rudalarni qayta ishlash bilan shug'ullanuvchi bir qator korxonalar faoliyati tahlil qilingan. Xususan, Kalgoorlie Consolidated Gold Mines korxonasida 2001-yildan boshlab flotatsiya konsentratlarini qayta ishlash jarayonida kuydirish pechlari yuklamasini kamaytirish va texnologik samaradorlikni oshirish maqsadida ultramayin yanchish (UFG) texnologiyasi amaliyotga joriy etilgan. Adabiyotlarda qayd etilishicha, 2002-yilda ikkinchi ultramayin yanchish tegirmonining ishga tushirilishi natijasida ishlab chiqarish quvvati soatiga 20 tonnadan ortiq darajaga yetkazilgan. Shu bilan birga, mahsulotning yanchilish o'lchami 11-12 mkm gacha kamaytirilib, oltinni ajratib olish ko'rsatkichi 90 % dan yuqori bo'lishiga erishilgan [1].

2002-2003-yillarda olib borilgan sanoat sinovlari, laboratoriya tadqiqotlari va tajriba qurilmalari asosidagi ishlanmalar texnologik jarayonlarni takomillashtirishga xizmat qilgan. Ushbu tadqiqotlar ultramayin yanchish va keyingi sianlash jarayonlarining mexanizmini chuqurroq o'rganish imkonini berib, ultramayin yanchish hamda oksidlovchi kuydirish texnologiyalari o'rtasidagi samaradorlik tafovutini sezilarli darajada qisqartirishga yordam bergan. Manbalarda ultramayin yanchish texnologiyasi murakkab oltin tarkibli rudalarni qayta ishlashda oksidlovchi kuydirish bosqichiga muqobil usullardan biri sifatida baholanishi qayd etilgan.

Adabiyotlarda qayd etilishicha, qiyin boyitiluvchan oltin rudalarini qayta ishlashda keng qo'llaniladigan an'anaviy yondashuvlardan biri sulfidli minerallarni, xususan piritni oksidlash orqali parchalash va shu asosda oltinni ajratib olishdan iborat. Bunday texnologiyalarga kuydirish, bosim ostida oksidlash hamda bakterial oksidlash jarayonlari kiradi. Mazkur usullarda piritning kislorod bilan o'zaro reaksiyasi natijasida temir oksidlari va oltingugurtli birikmalar hosil bo'lishi ta'minlanadi. Jarayonning borishi uchun esa turli harorat, bosim hamda katalitik sharoitlardan foydalaniladi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, ushbu texnologiyalar



mayda dispers holatda joylashgan yoki qattiq eritma tarkibiga kirgan oltinni samarali ajratib olish imkonini beradi [1].

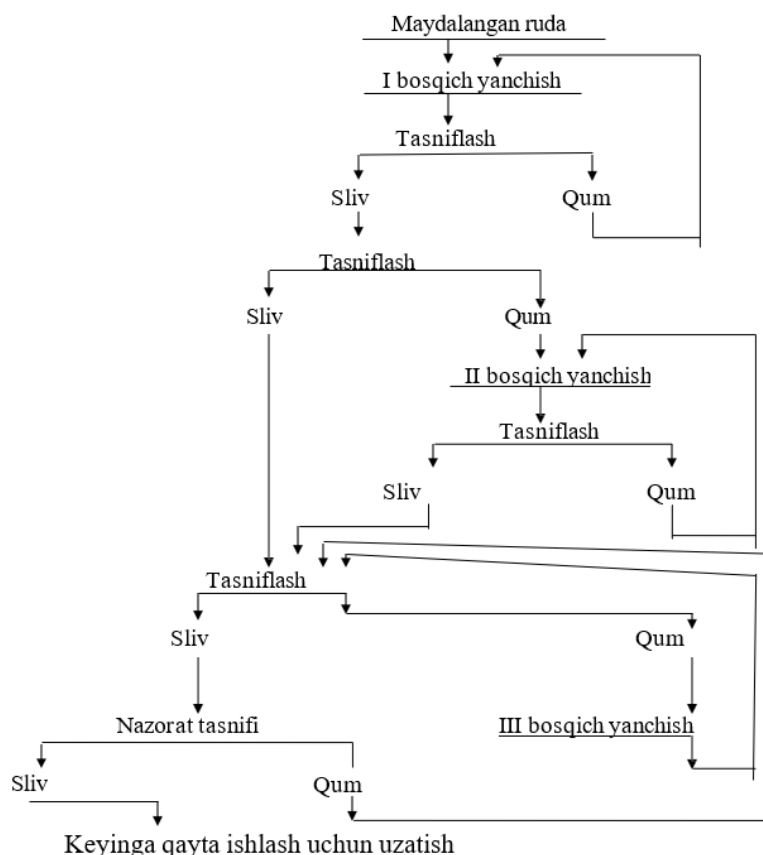
Shu bilan birga, manbalarda oksidlovchi texnologiyalarning yuqori metallurgik samaradorligiga qaramay, hosil bo'ladigan reaksiya mahsulotlarini qayta ishlash bilan bog'liq ekologik muammolar jarayonning iqtisodiy ko'rsatkichlariga sezilarli ta'sir qilishi ta'kidlangan. Jumladan, sulfidlarni kuydirish jarayonida ajralib chiqadigan oltingugurt dioksidini ushlab qolish va utilizatsiya qilish, shuningdek bosim ostida oksidlash natijasida hosil bo'ladigan kislotali eritmalarini neytrallashtirish qo'shimcha texnologik xarajatlarni talab qiladi. Ayrim tadqiqotlarda aynan ushbu omillar murakkab oltin tarkibli rudalarni qayta ishlashda ultramayin yanchish kabi muqobil texnologiyalarni iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq variant sifatida ko'rib chiqishga sabab bo'lishi qayd etilgan.

Tadqiqot qismi

Mayin yanchish. Adabiyotlarda murakkab oltin tarkibli rudalardan dispers holatda joylashgan oltinni ajratib olishning muqobil yo'nalishlaridan biri sifatida mayin va ultramayin yanchish texnologiyalari ko'rib chiqilgan. Mazkur yondashuvning asosiy mohiyati mineral zarrachalarining o'lchamini yanada kichraytirish orqali oltin yuzasining ma'lum qismini ochish va uning sianli eritmalar bilan o'zaro ta'sirini kuchaytirishdan iborat. Tadqiqotchilar ta'kidlashicha, ushbu usulda asosiy sulfidli minerallar oksidlovchi kimyoviy reaksiyalar orqali parchalanmaydi, bu esa reaksiya mahsulotlarini neytrallashtirish va utilizatsiya qilish bilan bog'liq ekologik hamda texnologik muammolarni kamaytirishga imkon beradi [2].

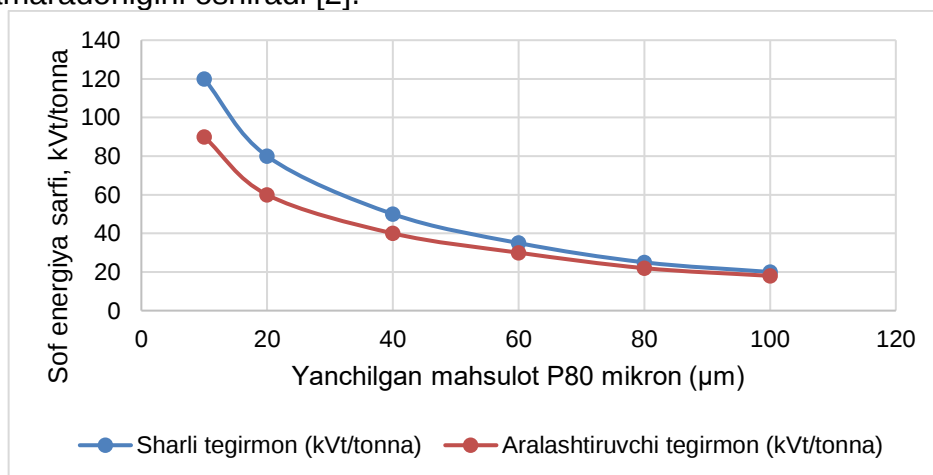
Shu bilan birga, manbalarda mayin yanchish jarayonining asosiy cheklovchi omillaridan biri sifatida energiya sarfining keskin ortishi qayd etilgan. Zarrachalar o'lchami kamayib borgan sari ularni yanada maydalash uchun talab etiladigan energiya miqdori ortib boradi (2-rasm). Tadqiqotlarga ko'ra, karyerlarda amalga oshiriladigan portlatish ishlari, birlamchi va ikkilamchi maydalash, shuningdek yarim o'zi yanchar hamda sharli tegirmonlarda olib boriladigan yanchish jarayonlari asosan rudaning tabiiy yoriqlari va zaif sinish tekisliklaridan foydalanishga asoslanadi.

Adabiyotlarda ta'kidlanishicha, yanchish darajasi ortib borgan sari rudani tashkil etuvchi minerallar asta-sekin bir-biridan ajraladi va ma'lum chegaraviy o'lchamga yetgandan so'ng zarrachalarni yanada kichraytirish uchun mineralning kristall panjarasini buzish talab etiladi. Mazkur holat yanchish jarayonining murakkablashishiga olib kelib, zarrachalarni sindirish uchun yuqori energiya quvvatlarini talab qiladi. Shu sababli, ultramayin yanchish texnologiyalarini qo'llashda energiya sarfi va texnologik samaradorlik o'rtasidagi optimal nisbatni aniqlash muhim omillardan biri sifatida qaraladi. O'tmishda an'anaviy yanchish texnologiyalari bilan bog'liq bo'lgan samarasizliklar ultramayin yanchish usulini foydali qazilmalarni qayta ishlash sanoati uchun mos bo'lmagan yo'nalishga aylantirgan edi. Qattiq minerallarni kerakli yanchish darajasiga yetkazish faqat uzoq vaqt davomida yanchish orqali amalga oshiriladi, bu esa o'z navbatida ishlab chiqarish unumdorligining past bo'lishiga va energiya sarfining keskin oshishiga olib keladi. Yopiq siklda kichikroq o'lchamdagi yanchuvchi jismlardan (sferalar/sharlar) foydalanish aylanuvchi tegirmonlarga mayin yanchish darajasiga erishishda yordam berishi mumkin, biroq ular yanchuvchi jismlarga kinetik energiya uzatish usuli jihatidan tubdan cheklangan. Shuningdek, ularning ichida jismlar deyarli harakatlanmaydigan katta "harakatsiz zonalar" mavjud bo'ladi. Yanchuvchi jismlarning o'lchami kichraygani sari, ularga uzatiladigan kinetik energiya ham kamayadi, bu esa jism va ruda zarrasi to'qnashganda uzatiladigan foydali energiya miqdorini sezilarli darajada pasaytiradi [2].



2-rasm. Murakkab oltin tarkibli rudalarni mayin yanchishning odatiy sxemasi.

Ultramayin yanchish. Adabiyotlarda ultramayin yanchish texnologiyasi an'anaviy yanchish jarayonlarining kamchiliklarini bartaraf etishga qaratilgan zamonaviy yondashuv sifatida tavsiflanadi. Ultramayin yanchish tegirmonlari qo'zg'almas korpus ichida joylashgan aylanuvchi aralashtirgichlar yordamida materialni juda yuqori darajada yanchish imkonini beradi. Ushbu texnologiya foydali qazilmalarni boyitish sanoatida qo'llanilishidan oldin ham farmatsevtika, bo'yoqlar, pigmentlar hamda gil materiallarini ishlab chiqarish kabi sohalarda keng qo'llanilib kelgan. Tadqiqotlarda qayd etilishicha, ultramayin yanchish jarayonida zarrachalar odatda 1-10 mkm diapazongacha yanchiladi. Bunday yuqori darajadagi yanchish natijasida materialning solishtirma sirt yuzasi sezilarli darajada ortadi, bu esa uning kimyoviy reaksiya faolligini kuchaytiradi va keyingi gidrometallurgik jarayonlarda metall ajratib olish samaradorligini oshiradi [2].



3-rasm. Yanchilgan mahsulot o'lchamlarini taqqoslash.

Adabiyotlarda, shuningdek, Kalgoorlie Consolidated Gold Mines korxonasining konsentratini qayta ishlash jarayonida laboratoriya sharli tegirmoni va ultramayin yanchish tegirmoni energiya sarfi bo'yicha qiyosiy tahlil qilinganligi keltiriladi (3-rasm). Ushbu solishtirma natijalar ultramayin yanchish texnologiyasining yuqori yanchish samaradorligiga qaramay, energiya sarfi nuqtai nazaridan jarayon optimallashtirilishi zarurligini ko'rsatadi [2].

Foydali qazilmalarni boyitish sanoatida ultramayin yanchish texnologiyasining qo'llanilishi nisbatan yangi yo'nalishlardan biri hisoblanadi. Ushbu yondashuv boshqa sanoat tarmoqlarida yuqori qiymatli mahsulotlar olishda qo'llaniladigan, kichik hajmli va davriy ishlovchi ultramayin yanchish tegirmonlari tajribasi asosida rivojlangan.

Boyitish sanoatida esa asosiy talab uzluksiz ishlash rejimida soatiga bir necha tonna mahsulotni qayta ishlash imkoniyatiga ega bo'lgan, shu bilan birga energiya sarfi hamda yanchuvchi jismlar iste'moli jihatidan iqtisodiy samaradorligi yuqori bo'lgan tegirmonlarni yaratishdan iboratdir.

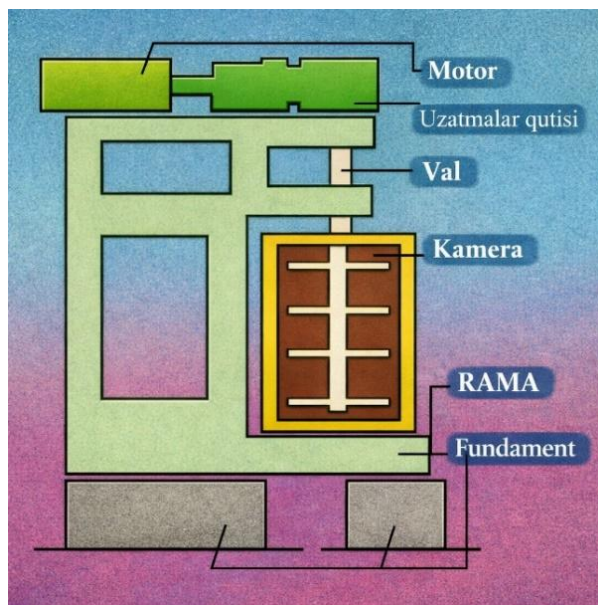
Tadqiqotlarda ko'rsatilishicha, yuqori darajadagi yanchish - ya'ni ultramayin holatga erishish uchun bunday tegirmonlarda an'anaviy yanchish qurilmalariga nisbatan (12-100 mm) ancha kichik o'lchamdagi (2-3 mm) yanchuvchi jismlar qo'llaniladi. Bundan tashqari, tegirmon hajmining birligiga to'g'ri keladigan o'rnatilgan quvvat miqdori ham an'anaviy texnologiyalarga nisbatan sezilarli darajada yuqori ekanligi adabiyotlarda qayd etilgan (1-jadval) [2].

1-jadval

Tegirmonning tipik yanchilish darajalari va quvvat sarfi ko'rsatkichlari.

Tegirmon turi	Yanchishning odatiy kichik o'lchami P80 mkm	Quvvat intensivligi kVt/m ³
Sharli tegirmon	75	20
Vertikal minorali tegirmon	20	40
Ultramayin yanchish tegirmoni	5	280

Ultramayin yanchish tegirmonlarining konstruktiv jihatdan ikki asosiy turi ajratib ko'rsatiladi: vertikal aralashtirgichli (stirerli) va gorizontal aralashtirgichli tegirmonlar (4-rasm).



4-rasm. Vertikal ultramayin yanchish tegirmonining joylashuvi.



Har ikkala turdagi qurilmalarda ham yanchish jarayoni qo'zg'almas korpus ichida joylashgan aylanuvchi aralashtirgichlar yordamida amalga oshiriladi, bunda ultramayin yanchuvchi jismlar (ko'pincha kvars qumi yoki shunga o'xshash materiallar) massasiga kinetik energiya uzatiladi. Tadqiqotlarga ko'ra, yanchish mexanizmi ushbu ikki turdagi tegirmonlarda umumiy bo'lib, asosiy farqlar konstruktiv va ekspluatatsion xususiyatlar bilan bog'liq. Jumladan, aralashtirgichning aylanish tezligi, yanchuvchi muhitni ushlab turish usuli hamda amaliyotda mavjud tegirmonlarning o'lcham parametrlari ularning ish samaradorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli, ultramayin yanchish texnologiyalarini tanlashda jarayon sharoitlari va uskunaning konstruktiv xususiyatlari muhim ahamiyat kasb etadi [2].

Yanchilish va zarralarning reaksiya qobiliyati. Adabiyotlarda ta'kidlanishicha, ultramayin yanchish jarayonida tegirmon mahsulotlarining erkinlik darajasi, ya'ni mineral zarrachalarning bo'sh jinslardan ajralish ko'rsatkichi oshib boradi. Shu bilan birga, zarrachalarning solishtirma sirt yuzasi sezilarli darajada kengayadi, bu esa keyingi gidrometallurgik bosqichlarda kimyoviy reaksiyalar tezligining ortishiga olib keladi.

Tadqiqotchilar fikriga ko'ra, intensiv mexanik kuchlanishlar ta'sirida mineral kristall panjarasida deformatsiya yuzaga keladi hamda uning tarkibida nuqsonli (defektli) sohalar hosil bo'ladi. Bunday o'zgarishlar materialda lokal elektron zichligining oshishiga olib kelib, elektronlarning oksidlovchi muhit bilan o'zaro ta'sirini osonlashtiradi. Natijada kimyoviy reaksiyalar tezligi sezilarli darajada ortadi [3].

Shu jarayonlar oqibatida tegirmon mahsulotlarining reaksiya jarayonlari uchun zarur bo'lgan aktivlanish energiyasi kamayadi va reaksiyalar yanchilmagan materialga nisbatan pastroq harorat hamda bosim sharoitlarida sodir bo'lishi mumkin bo'ladi. Reaksiya qobiliyatning bunday ortishi, xususan, piritning ultramayin yanchishdan so'ng kislorodga nisbatan yuqori reaktivligi orqali namoyon bo'ladi.

Adabiyotlarda "Activox" va "Albion" kabi texnologik jarayonlar aynan ushbu hodisadan foydalanishi qayd etilgan. Mazkur texnologiyalar sulfidli minerallarni pastroq harorat va bosim sharoitlarida eritish imkonini berib, an'anaviy bosim ostida oksidlash usullariga muqobil sifatida qaraladi.

Biroq, tadqiqotlar shuni ham ko'rsatadiki, piritning reaksiya faolligining ortishi ayrim hollarda istalmagan yon (nojo'ya) reaksiyalarni ham kuchaytirishi mumkin. Bu esa tanlab eritish jarayonida sian va ohak sarfining oshishiga olib keladi hamda texnologik jarayonning umumiy iqtisodiy samaradorligiga ta'sir ko'rsatishi mumkin.

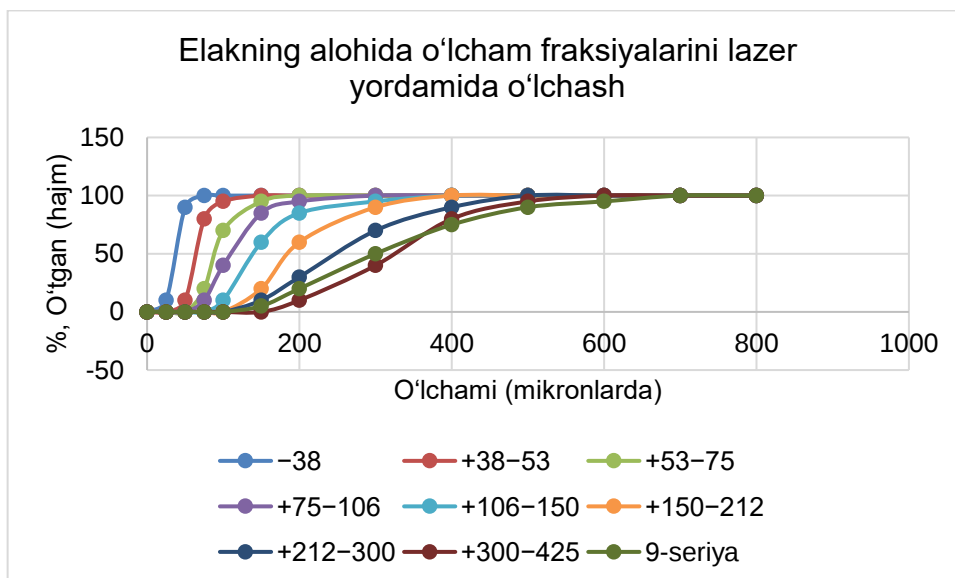
Mahsulot o'lchamlarini aniqlash (granulometrik tahlil). Adabiyotlarda qayd etilishicha, so'nggi yillarda mayda zarrachalar o'lchamini aniqlashda lazerli granulometrik tahlil usuli keng ommalashib, amaliyotda de-fakto standart sifatida qo'llanilmoqda.

Dastlabki lazerli o'lchash qurilmalarida mavjud bo'lgan bir qator cheklovlar zamonaviy hisoblash texnologiyalarining rivojlanishi hisobiga bartaraf etilgan bo'lib, bu yorug'likning sochilish xususiyatlari va zarracha o'lchami o'rtasidagi bog'liqlikni ifodalovchi Mie (yorug'lik sochilishi nazariyasi) tenglamasidan foydalanish imkonini yaratdi. Ushbu usul zarrachalarning o'rtacha hajmini aniqlab, uni ekvivalent diametr ko'rinishiga keltirish orqali baholashni amalga oshiradi.

Shu jihatdan lazerli tahlil usuli zarrachalarning elak teshigidan o'tish qobiliyatiga asoslangan an'anaviy elakli tahlildan tubdan farq qiladi [4].

Kalgoorlie Consolidated Gold Mines korxonasida olib borilgan tadqiqotlar natijasida lazerli granulometrik tahlildagi asosiy xatolik manbai sifatida umumiy namunadan juda kichik miqdordagi qism-namunani ajratib olish jarayoni aniqlangan. Eksperimental natijalarga ko'ra, o'lchami 50 mikrondan katta bo'lgan zarrachalar uchun o'lchov natijalarining takrorlanuvchanligini ta'minlash maqsadida qo'shimcha qism-namuna olish bosqichini qo'llash zarurligi qayd etilgan [1].

Shuningdek, yirik zarrachalarni elak yordamida ajratib olish, elak osti fraksiyasini esa lazerli tahlil orqali aniqlab, so'ngra natijalarni birlashtirish amaliyotiga ehtiyotkorlik bilan yondashish lozimligi ta'kidlanadi. Adabiyotlarda quruq elash natijasida olingan fraksiyalarni lazerli tahlil qilishda turli xil natijalar yuzaga kelishi mumkinligi 5-rasmda yaqqol ko'rsatib berilgan.



5-rasm. Lazerli va elakli saralash usullarini qiyosiy tahlil qilish.

Yanchish usuli. Adabiyotlarda yanchish jarayonining samaradorligi ko'p jihatdan "stress intensivligi" tushunchasi bilan izohlanadi. Stress intensivligi deganda har bir zarba yoki zarrachalar o'zaro kontakt qilgan paytda ularga uzatiladigan energiya miqdori tushuniladi va u harakatdagi yanchuvchi jismlarning kinetik energiyasiga bevosita bog'liq omil sifatida qaraladi. Bu ko'rsatkich yanchuvchi jism diametri d , aralashtirish tezligi v hamda yanchuvchi jism zichligi ρ orqali quyidagi ko'rinishda ifodalanadi [5]:

$$\text{Kuchlanish intensivligi (Nm)} = d^3 \times v^2 \times \rho \quad (1)$$

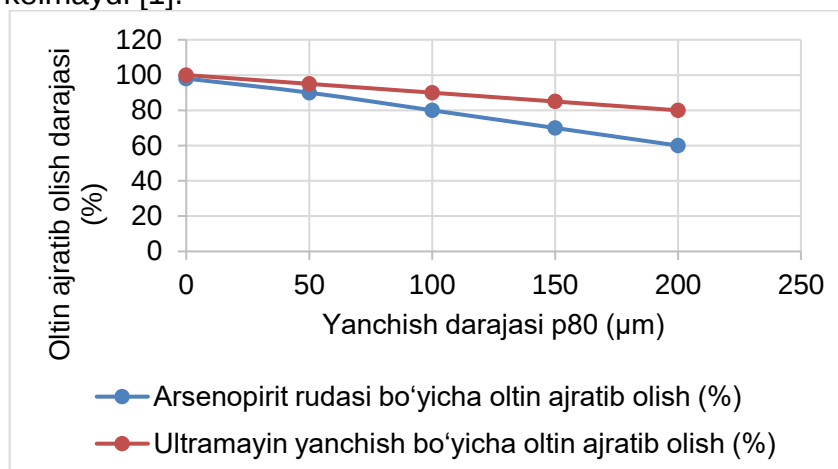
1-tenglamadan ko'rinadiki, stress intensivligi yanchuvchi jism diametrining kubiga mutanosib bo'lib, bu parametr jarayonning energetik xarakteristikasiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Bir xil material va bir xil aylanish tezligi sharoitida yanchuvchi jism diametri 3 mm dan 6 mm gacha oshirilganda, stress intensivligi taxminan 8 baravarga ortishi kuzatiladi. Bu esa xomashyo zarracha o'lchami, yanchuvchi jismlar tanlovi hamda tegirmon ichki himoya elementlarining yeyilishi o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni muhim texnologik omil sifatida belgilaydi.

Tadqiqotlarda Kvade tomonidan 1 μm dan katta zarrachalar uchun aralashtirgichli tegirmonlarda asosiy yanchish mexanizmi ishqalanish emas, balki zarba ta'sirida yemirilish ekanligi aniqlangan [6]. Shu bilan birga, Yu va Kleyn tomonidan olib borilgan ketma-ket yanchish sikllari bo'yicha tadqiqotlarda ma'lum bir yanchish chegarasi mavjudligi ko'rsatilgan. Ushbu chegaradan keyin yanchish vaqtini oshirish zarrachalarning qo'shimcha parchalanishiga olib kelmaydi [8].

Mazkur mualliflar ushbu holatni stress intensivligi bilan bog'liq bo'lib, kritik darajaga yetganda asosiy yanchish mexanizmi sinishdan ishqalanishga o'tishi bilan izohlaganlar. Natijada jarayon samaradorligi pasayib, energiya sarfi ortib borishi mumkinligi qayd etilgan.

Namuna sinov ishlari. Adabiyotlarda qayd etilishicha, murakkab oltin tarkibli rudalarni ultramayin yanchishdan keyingi sinov ishlari har doim ham kutilgan yuqori metall ajratib olish samaradorligini ta'minlamaydi. Xususan, ayrim holatlarda arsenopirit va pirit minerallari tarkibida bog'langan oltin zarrachalarini to'liq va yuqori darajada ajratib olish imkoniyati cheklanganligi aniqlangan. Tadqiqotchilar bu holatni oltin zarrachalarining o'lchami pirit

minerali zarrachalariga nisbatan sezilarli darajada kichik bo'lishi bilan izohlaydilar. Natijada, ultramayin yanchish jarayonida ham oltinning bir qismi sulfid minerallari ichida yopiq holatda qolishi yoki to'liq ochilmasligi mumkin (6-rasm). Shu sababli, bunday rudalarda faqat yanchish darajasini oshirish har doim ham metall ajratib olish samaradorligini sezilarli yaxshilashga olib kelmaydi [1].



6-rasm. Arsenopirit va piritli rudalardan oltin ajratib olish

Olib borilgan tadqiqot natijalariga ko'ra, Kalgoorlie Consolidated Gold Mines konsentratini 10 mkm gacha mayin yanchish orqali oltin ajratib olish ko'rsatkichini 75 % dan 92 % gacha oshirish mumkinligi aniqlangan [1].

Yanchish qurilmasini (tegirmon) tanlash. Adabiyotlarda qayd etilishicha, ultramayin yanchish texnologiyasi uchun tegirmon tanlash bosqichi bir qator texnik va metodologik murakkabliklar bilan bog'liq bo'lgan. Dastlab, yakuniy konsentratning bir xil namunalarini turli yirik tegirmon ishlab chiqaruvchilariga sinov baholash uchun yuborish amaliyoti qo'llangan. Biroq olingan natijalar sinov metodikalari, yanchish sharoitlari hamda zarracha o'lchamini aniqlash usullaridagi farqlar sababli o'zaro to'liq taqqoslash imkonini bermagan [1].

Korxonalarga tashrif buyurish orqali amalga oshirilgan amaliy o'rganishlar texnik xizmat ko'rsatish talablari va operatorlar tajribasi bo'yicha umumiy tasavvur hosil qilishga yordam bergan bo'lsa-da, rudalarning mineralogik xilma-xilligi, qattiqlik darajasi hamda xomashyo granulometrik tarkibining o'zgaruvchanligi tufayli metallurgik samaradorlikni aniq solishtirish qiyin bo'lgan.

Dastlabki tahlillar asosida tegirmon tanlovi asosan Detritor va IsaMill tizimlari orasida jamlangan. Ushbu ikki texnologiyani bevosita sanoat sharoitida taqqoslash maqsadida quvvati 18,5 kVt bo'lgan tajriba Detritor qurilmasi hamda 55 kVt quvvatga ega IsaMill tegirmoni ishlab chiqarish maydoniga o'rnatilib sinovdan o'tkazilgan.

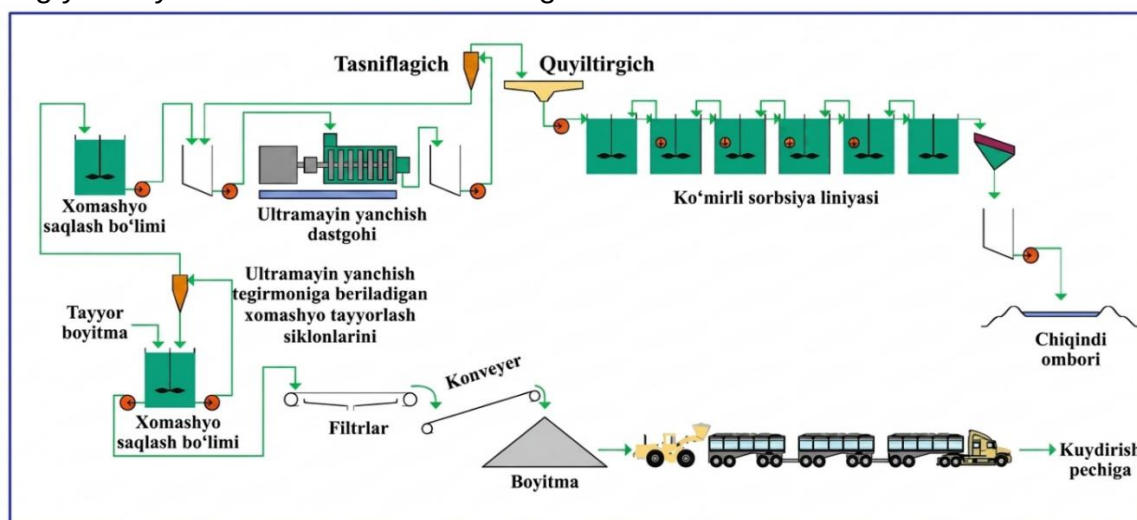
Natijalar shuni ko'rsatdiki, har ikki qurilma o'xshash ish sharoitlarida mahsulot sifati va energiya sarfi bo'yicha sezilarli farq bermagan. Metallurgik samaradorlik nuqtai nazaridan ham muhim tafovut aniqlanmagan. Shu asosda Kalgoorlie Consolidated Gold Mines korxonasi tegirmonning ixcham o'lchami, texnik xizmat ko'rsatishning nisbatan soddaligi hamda amaliy sinovlarda tasdiqlangan ish unumdorligini inobatga olib IsaMill texnologiyasini tanlashga qaror qilgan.

Kalgoorlie Consolidated Gold Mines (KCGM) korxonasi texnologik sxemasi. Adabiyotlarda qayd etilishicha, Kalgoorlie Consolidated Gold Mines korxonasi uchun asosiy texnologik muammolardan biri 10 mkm gacha yanchiladigan piritli rudani sianli tanlab eritish jarayonida reagentlar sarfini iqtisodiy jihatdan maqbul darajada ushlab turish masalasining amaliy jihatdan to'liq isbotlanmaganligi bo'lgan. Ushbu xavfni kamaytirish hamda jarayon bilan bog'liq kapital xarajatlarni optimallashtirish maqsadida bir bosqichli yanchish texnologiyasini joriy etish qarori qabul qilingan. Bunda yirik xomashyoni bevosita bir martalik

yanchishdan o'tkazish natijasida energiya sarfi hamda tegirmon va siklon tizimining umumiy samaradorligida ma'lum darajada pasayish bo'lishi oldindan inobatga olingan [1].

Tegirmonga beriladigan xomashyo granulometrik tarkibining yirikligini kamaytirish uchun ultramayin yanchish bosqichiga kiruvchi material oldindan tasniflash (klassifikatsiya) jarayonidan o'tkazilgan. Ushbu bosqichda yirik fraksiyalar tasniflagichning quyi oqimi orqali ajratib olinib, o'lchami muhim bo'lmagan kuydirish pechlariga yo'naltirilgan. Bu yondashuv tegirmonga tushadigan yuklamani kamaytirishga xizmat qilgan bo'lsada, konsentrat tarkibidagi maqsadga muvofiq o'lchamdagi material miqdorining cheklanganligi jarayon ko'rsatkichlarida o'zgaruvchanlikni keltirib chiqargan.

Shuningdek, dastlabki tasniflash jarayoni natijasida tegirmonga nisbatan ko'proq miqdorda mayda bo'sh jins materiallarining kirib borishi kuzatilgan bo'lib, bu ham umumiy texnologik jarayonning barqarorligiga ma'lum darajada ta'sir ko'rsatgan. Mazkur texnologik sxemaning yakuniy ko'rinishi 7-rasmda keltirilgan.



7-rasm. Kalgoorlie Consolidated Gold Mines (KCGM) texnologik sxemasi

Jarayonning asosiy loyihalash mezonlari (ko'rsatkichlari) 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval

Ultramayin yanchish jarayonining asosiy loyihalash mezonlari

Ko'rsatkichlar	Loyihalash
Konsentrat bo'yicha qayta ishlash unumdorligi	10 t/s
Shlamdan tozalangan konsentrat qattiq zarrachalarining o'lcham taqsimoti F80	120 mikron
Ultramayin yanchish jarayoniga kiruvchi mahsulotidagi qattiq zarrachalarining o'lcham taqsimoti P80	50 mikron
Konsentratdagi oltinning dastlabki miqdori	40 dan 50 g/t gacha
Ultramayin yanchishga tayyorlash mahsulotining qattiq faza miqdori	45 % dan 55 % gacha (og'itlik bo'yicha)
Ultramayin yanchish mahsulotida qattiq zarrachalarining o'lcham taqsimoti P80	10 mikron
Oltin ajratib olish darajasi	92 %

Yanchuvchi jismlarni tanlash. Ultramayin yanchish jarayonida yanchuvchi jismlarni tanlash texnologik samaradorlikni belgilovchi asosiy omillardan biri sifatida qaraladi. Ushbu jarayonda yanchuvchi jism o'lchami odatda tegirmonga kiruvchi xomashyoning maksimal zarracha o'lchamiga mos ravishda belgilanadi. Tajriba-sanoat sharoitidagi sinovlar shuni



ko'rsatadiki, yanchuvchi jismlar miqdorining yetarli bo'lmashligi yoki ularning o'lchami haddan tashqari kichik bo'lishi tegirmon ichida yirik, to'liq yanchilmagan zarrachalarning to'planib qolishiga olib kelishi mumkin.

Bunday holat material oqimining cheklanishi, zarrachalarning devorlarga yopishib qolishi hamda jarayonning umumiy energiya samaradorligi pasayishi bilan namoyon bo'ladi. Shu sababli, yirik zarrachalarning to'liq yanchilishini ta'minlash maqsadida maksimal o'lchami 6 mm bo'lgan qum zarrachalaridan foydalanish ma'qul deb topilgan.

Adabiyotlarda arzonligi va mavjudligi sababli kvars qumi asosiy yanchuvchi jism sifatida tanlanganligi qayd etiladi. Dastlabki xomashyo Avstraliyaning Yangi Janubiy Uels shtati shimoliy hududlaridan keltirilgan. Muqobil manbalar bo'yicha olib borilgan izlanishlarga qaramay, faqat ayrim hududlardagina yemirilish darajasi past va mustahkamligi yetarli bo'lgan qum zaxiralari aniqlangan. Po'lat, metallurgik shlak hamda keramika asosidagi yanchuvchi jismlar ham sinovdan o'tkazilgan bo'lsada, ularning yuqori narxi, tez yeyilishi hamda tanlab eritish jarayoniga temir kabi zararli aralashmalar kiritishi sababli texnologik jihatdan ma'qul variant sifatida qabul qilinmagan [2].

Shu bilan birga, 6 mm o'lchamdagi yanchuvchi jismlardan foydalanish yirik zarrachalarni samarali yanchish imkonini bergan bo'lsada, tegirmonning ichki qismlarida tezkor yeyilish jarayonini kuchaytirgan. Natijada, birinchi (yetakchi) diskning intensiv yeyilishi sababli qurilmani taxminan har o'n kunda to'xtatib texnik xizmat ko'rsatish zarur bo'lgan. Taqqoslash uchun, 3 mm yanchuvchi jismlar bilan ishlaydigan IsaMill tipidagi qurilmalarda bunday to'xtashlar ancha kam - bir necha oyda bir marta kuzatiladi.

Tadqiqotlarda qayd etilishicha, yanchuvchi jism o'lchami ularning kinetik energiyasini belgilovchi eng muhim parametr hisoblanadi va bu energiya jism diametrining kubiga mutanosibdir. Bir xil material va aylanish tezligi sharoitida yanchuvchi jism diametri 3 mm dan 6 mm gacha oshirilganda, kinetik energiya taxminan 8 barobar ortadi ($2^3 = 8$). Bu holat xomashyo zarracha o'lchami, yanchuvchi jism tanlovi hamda tegirmon ichki qismlarining yeyilish darajasi o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikning naqadar muhim ekanligini yaqqol ko'rsatadi [3].

Gidrosiklonlar. Adabiyotlarda qayd etilishicha, klassifikatsiyalovchi gidrosiklonlar bilan jihozlangan yopiq siklli yanchish tizimi ochiq siklga nisbatan tegirmon unumdorligini sezilarli darajada oshiradi. Bu holat ayniqsa tegirmonga kirib kelayotgan xomashyo zarracha o'lchami keng diapazonda bo'lgan sharoitlarda yaqqol namoyon bo'ladi.

Kalgoorlie Consolidated Gold Mines texnologik sxemasida yopiq siklning asosiy vazifasi - tanlab eritish jarayoni uchun zarur bo'lgan optimal granulometrik tarkibdagi mahsulotni ta'minlash, shu bilan birga tegirmon ishlashi uchun kerakli pulpa zichligini (taxminan 55 %) saqlab turish hamda mayda fraksiyalarni yuqori oqimga samarali ajratib chiqarishdan iboratdir.

Tadqiqotlarda ta'kidlanishicha, yopiq sikl tizimi oltinni tanlab eritish jarayoniga ham ijobiy ta'sir ko'rsatadi. Chunki oltin tashuvchi pirit minerallari yuqori solishtirma og'irlikka ega bo'lib, ular bir xil o'lchamdagi, lekin zichligi past bo'lgan zarrachalarga nisbatan gidrosiklonning pastki oqimiga ko'proq yo'naltiriladi. Ushbu tabiiy segregatsiya jarayoni og'ir minerallarning tegirmon ichida qayta aylanishiga olib keladi va ular yetarli darajada yanchilmaguncha jarayonda ishtirok etishda davom etadi. Natijada, zarracha o'lchami kichrayib, zichlik farqi ta'siri kamayganidan so'nggina ular yuqori oqim orqali tanlab eritish bosqichiga o'tadi [4].

Adabiyotlarda qayd etilishicha, korxona gidrosiklon klassifikatsiyasi uchun 68 mm li siklonlardan foydalangan bo'lib, ular tanlab eritish jarayoni uchun P80 - 10 μm o'lchamli mahsulot olishda muhim rol o'ynagan. Biroq ushbu tizim ekspluatatsiya jarayonida shtutserlarning tiqilib qolishi va yuqori yeyilish darajasi kabi bir qator texnik muammolarni keltirib chiqargan [5].



10 mm diametrli shtutserlar qo'llanilganda chiqindi va qum zarrachalari hisobiga tez-tez tiqilib qolish holatlari kuzatilgan. Bu esa ba'zi hollarda yanchilmagan materialning bevosita tanlab eritish bosqichiga o'tib ketishiga sabab bo'lib, oltin ajratib olish samaradorligini pasaytirgan. Keyinchalik tegirmon chiqishi bilan siklonni ta'minlovchi bunker o'rtasiga vibratsion elak o'rnatilishi natijasida bu muammo sezilarli darajada kamaygan. Hozirgi sharoitda esa asosiy tiqilish sababi siklon pastki oqimining ortiqcha yuklanishi va shtutser hududida material "ko'prik" hosil qilish tendensiyasi bilan izohlanadi.

Quyiltirish. Gidrosiklonning yuqori oqimidan chiqadigan pulpaning nisbatan past zichligi (taxminan 8 %) tanlab eritish jarayoni uchun talab etiladigan 50 % atrofidagi zichlikka erishish maqsadida qo'shimcha quyiltirish bosqichini joriy etishni zarur qilgan. Ushbu bosqich pulpa konsentratsiyasini oshirish va keyingi gidrometallurgik jarayonlar uchun optimal sharoit yaratishga xizmat qiladi.

O'tkazilgan sinov tadqiqotlarida 10 μm o'lchamdagi zarrachalardan iborat mahsulot standart ion bo'lmagan poliakrilamid asosidagi flokulyant (sarfi 140 g/t) yordamida samarali flokulyatsiyalanishi aniqlangan. Bunda cho'kish va yiriklashish jarayoni taxminan 0,4 t/m²/soat tezlikda amalga oshgan[6].

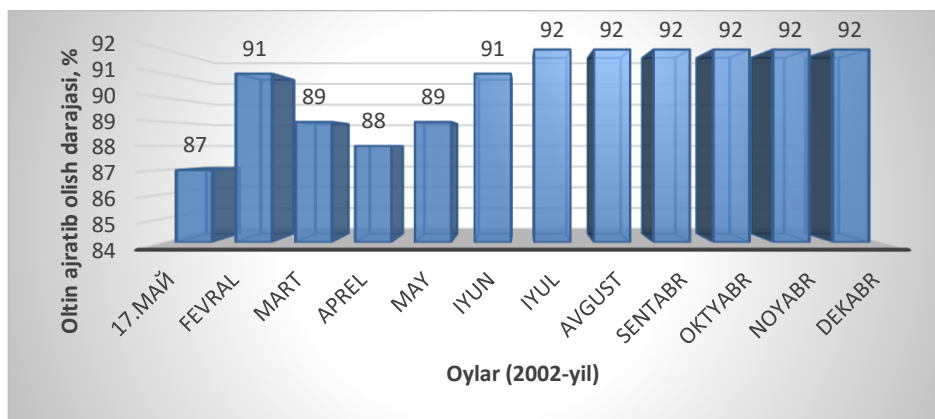
Zavod sharoitidagi amaliy tajribalar ushbu laboratoriya natijalarini tasdiqlagan bo'lib, quyiltirish jarayonining pastki oqimida 55 % gacha bo'lgan pulpa zichligiga barqaror ravishda erishish mumkinligi ko'rsatilgan. Shu tariqa, quyiltirish bosqichi tanlab eritish jarayoni uchun zarur bo'lgan texnologik parametrlarni ta'minlashda muhim ahamiyat kasb etadi.

Tanlab eritish. Adabiyotlarda sulfidli rudalarni tanlab eritish jarayoni murakkab gidrometallurgik bosqichlardan biri sifatida baholanadi, chunki unda bir qator yon (nojo'ya) reaksiyalar yuzaga kelib, reagentlar sarfining oshishi hamda oltin ajratib olish koeffitsiyentining pasayishiga olib kelishi mumkin. Ko'rib chiqilayotgan konsentrat tarkibida o'ta mayin yanchilgan yuqori miqdordagi pirit bilan bir qatorda, sian eritmalarida eruvchan bo'lgan xalkopirit ko'rinishidagi mis (taxminan 0,15 %) ham mavjud bo'lgan. Bundan tashqari, oltin telluridi (kalaverit)ning mavjudligi jarayonni yanada murakkablashtirib, maxsus tanlab eritish sharoitlarini qo'llashni talab etgan [7].

Laboratoriya sinovlari hamda sanoat amaliyotining dastlabki bosqichlarida kislorodga bo'lgan ehtiyojning yuqoriligi va tanlab eritish kinetikasining sekin kechishi kuzatilgan. Odatda, 15 kg/t miqdorida sianid sarflanganda oltin ajratib olish darajasi taxminan 90 % atrofida bo'lgan. 2002-yilda oltin ajratib olish samaradorligini oshirish va reagent sarfini kamaytirish maqsadida keng qamrovli laboratoriya hamda tajriba-sanoat sinovlarini o'z ichiga olgan maxsus rivojlantirish dasturi amalga oshirilgan.

Ushbu sinovlar natijasida tanlab eritish rejimi qayta ko'rib chiqilib, quyidagi o'zgarishlar joriy etilgan: dastlabki oksidlanish bosqichidan voz kechish, jarayon boshida qo'rg'oshin nitratini ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) qo'shish hamda eritmada kislorod konsentratsiyasini past darajada (taxminan 3 ppm) ushlab turish. Shuningdek, yuqori ishqoriy muhit (30 kg/t ohak sarfi) va sianlash jarayonida ko'mirdan foydalanish oltin telluridlarining erishiga ijobiy ta'sir ko'rsatishi aniqlangan.

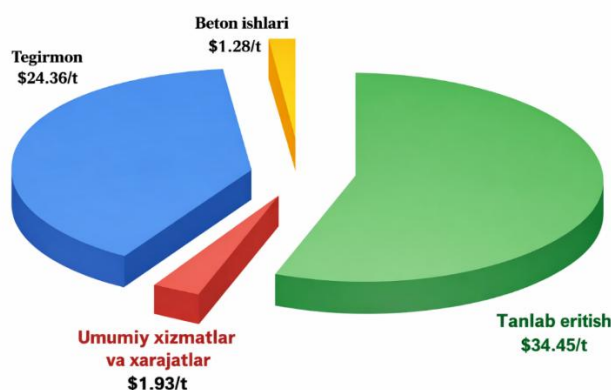
Mazkur optimallashtirilgan sharoitlar natijasida tanlab eritish davomiyligi 72 soatdan 24 soatgacha qisqargan, sianid sarfi 15 kg/t dan 8 kg/t gacha kamaygan hamda oltin ajratib olishning o'rtacha ko'rsatkichi taxminan 2 % ga oshgan (8-rasm). Shu bilan birga, pulpada 10 mikrondan kichik zarrachalar mavjud bo'lsa ham, ularning aktiv ko'mir teshiklarini to'sib qo'yishi bilan bog'liq salbiy holatlar kuzatilmagan, ya'ni ko'mirning adsorbsion faolligi barqaror saqlanib qolgan[8].



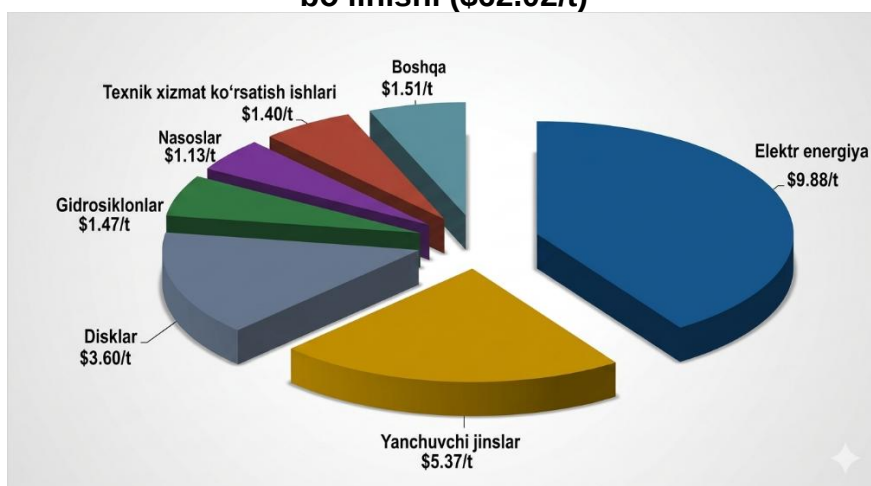
8-rasm. Oltinni ajratib olish koeffitsiyenti oshishi

Xarajatlar. Kalgoorlie Consolidated Gold Mines korxonasida ultramayin yanchish tegirmonlarining har bir qurilmasi uchun kapital xarajatlar taxminan 4,5 million AQSH dollarini tashkil etgan. Ishqorlash (tanlab eritish) jarayoniga tegishli qo'shimcha texnologik uskunalar bilan birgalikda, loyihaning umumiy qiymati EPCM (loyihalash, xarid qilish va qurilishni boshqarish, boshqaruv hamda ko'zda tutilmagan xarajatlar) hisobga olinganda, har bir texnologik zanjir uchun o'rtacha 6 million AQSH dollari atrofida baholangan.

Shuningdek, tegishli faoliyat turlari bo'yicha taqsimlangan operatsion (ishlab chiqarish) xarajatlari 9 va 10-rasmlarda keltirilgan bo'lib, ular jarayonning asosiy iqtisodiy tuzilmasini va xarajatlar ulushini batafsil ko'rsatib beradi.



9-rasm. Ultramayin yanchish jarayoni umumiy xarajatlarning tarkibiy qismlarga bo'linishi (\$62.02/t)



10-rasm. Ultramayin yanchish tegirmonida yanchish xarajatlarning tarkibiy qismlarga bo'linishi (\$24.36/t).



Xulosa

Adabiyotlarda qayd etilishicha, Kalgoorlie Consolidated Gold Mines korxonasida ultramayin yanchish texnologiyasi ikki yildan ortiq muddat davomida muvaffaqiyatli qo'llanilib, qiyin boyitiladigan sulfidli rudalardan oltin ajratib olishning iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiqligini amaliy jihatdan tasdiqlagan. Garchi oltin ajratib olish darajasi ayrim an'anaviy kuydirish texnologiyalariga nisbatan pastroq bo'lsa-da, asosiy ustuvor yo'nalish operatsion xarajatlarni sezilarli darajada kamaytirishga qaratilganligi ta'kidlanadi [8].

Olib borilgan tadqiqotlar jarayonni yanada takomillashtirish uchun bir qator istiqbolli yo'nalishlarni aniqlagan. Xususan, birlamchi yanchish bosqichini joriy etishning texnologik va iqtisodiy afzalliklarini baholash ishlari davom ettirilmoqda. Shuningdek, tegirmonga maydaroq xomashyo berilishi natijasida uskunalarining, jumladan tegirmon va siklonlarning yeyiluvchan qismlarining xizmat qilish muddati uzayishi kutilmoqda, bu esa yanchuvchi jismlar o'lchamini optimallashtirish va umumiy yeyilish darajasini kamaytirish imkonini beradi.

Tadqiqotlarda energiya samaradorligini oshirish hamda siklonlarda klassifikatsiya jarayonining yaxshilanishi hisobiga oltin ajratib olish ko'rsatkichlarini yanada oshirish mumkinligi ham qayd etilgan. Bundan tashqari, kelgusida keramik yanchuvchi jismlar sifatining yaxshilanishi va bozor hajmining kengayishi ularning narxini pasaytirib, texnologiyaning iqtisodiy samaradorligini oshirishga xizmat qilishi mumkinligi ta'kidlangan. Shu bilan birga, ultramayin yanchish tegirmonlarining kengayishi bilan mos sifat va o'lchamdagi qum xomashyosi zaxiralarining cheklanishi ehtimoli ham muhim omil sifatida ko'rsatilgan.

Umuman olganda, ultramayin yanchish texnologiyasi qiyin boyitiladigan oltin rudalarini qayta ishlashda an'anaviy oksidlovchi jarayonlarga samarali muqobil ekanligini isbotlagan bo'lib, uning boshqa metallarni gidrometallurgik usulda ajratib olishda qo'llanilishi kelgusida yangi texnologik yo'nalishlar va imkoniyatlarni shakllantirishi mumkinligi qayd etiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yhati:

- [1]. Ellis S. Ultra Fine Grinding - A Practical Alternative to Oxidative Treatment of Refractory Gold Ores // SME Annual Conference 2002. – Phoenix, Arizona: SME, 2002. – Preprint 02-072. – P. 7-12.
- [2]. Kalra R. Overview on Alternative Methods for Fine and Ultra-Fine Grinding // IIR Conference "Crushing and Grinding". – 1999.
- [3]. 3. Hurne M., Halbe D. The Nanotech Process: Results on Frieda River Copper-Gold Concentrates // Proceedings of the Randol Gold Conference. – 1999.
- [4]. 4. Turton-White N. Malvern Mastersizer Testwork: Investigating the Current Laser Sizing Procedure for Sizing Fine and Coarse Samples at KCGM: KCGM Report. – 2003.
- [5]. 5. Becker, M., Kwade, A., and Schwedes, J. (1997). "Ultra fine Grinding of Raw Ceramic Materials and Wear of Grinding Beads in Stirred Media Mills," Aufbereitungs Technik, 38 Nr8, pp. 430-438.
- [6]. Kwade A. Wet Comminution in Stirred Media Mills - Research and its Practical Application // Powder Technology. - 1999. - Vol. 105. - P. 14-20.
- [7]. Aripov A.R., Sayfullayev F.I., Qurbonov M.N., Xalilova Sh.I. Sanoatda raqamli texnologiyalar. - 2025. - T. 3, № 2. - C. 73-80.
- [8]. Yue J., Klein B. Particle Breakage in Horizontal Stirred Mills // CIM. – 2003.