

## MIS-MOLIBDEN RUDALARNI FLOTATSIYALASHDA TO‘PLOVCHI REAGENTLARNING TA‘SIR QILISH MEXANIZMINI VA OPTIMAL VARIANTINI TANLASH

**Askarova Go‘zal Olimjon qizi**

Toshkent Davlat Texnika Universiteti 1-kurs magistranti

[guzalaasqarova@icloud.com](mailto:guzalaasqarova@icloud.com)

### **Annotatsiya**

Ushbu maqolada mis-molibden (Cu–Mo) sulfidlari tarkibidagi mineralarning flotatsiyalash jarayonida to‘plovchi (kollektor) reagentlarning yuzaga ta‘sir qilish mexanizmi va optimal kollektor sxemasini tanlash yondashuvlari ko‘rib chiqiladi. Flotatsiya selektivligini oshirish va konsentrat sifatini optimallashtirish maqsadida kollektorlarning kimyoviy tuzilishi, minerallar yuzasida sorbsiya (adsorbsiya) mexanizmlari, pH, oksidlanish holati va depressorlardan foydalanish muhim omillar ekanligi adabiyotlar va laboratoriya-tajriba natijalari asosida tasdiqlandi. Tavsiya etilgan optimal variant — minerallar tarkibi va sanoat sharoitiga mos ravishda eksperimental ravishda tasdiqlanishi zarur.

**Kalit so‘zlar:** xalkopirit, molibdenit, kollektorlar, xantat, ditiyofosfat, adsorbsiya, selektivlik, depressor.

### **Аннотация**

В данной статье рассматриваются механизмы взаимодействия коллекторных реагентов с поверхностью минералов, содержащихся в сульфидах меди-молибдена (Cu–Mo), в процессе флотации, а также подходы к выбору оптимальной схемы применения коллекторов. С целью повышения селективности флотации и оптимизации качества концентрата были подтверждены, на основании литературы и лабораторно-экспериментальных данных, важность химической структуры коллекторов, механизмов сорбции (адсорбции) на поверхности минералов, pH, степени окисления и использования депрессоров. Рекомендуемый оптимальный вариант необходимо экспериментально подтвердить с учётом состава минералов и условий промышленного производства.

**Ключевые слова:** халькопирит, молибденит, коллекторы, ксантат, дитиофосфат, адсорбция, селективность, депрессор.

### **Annotation**

This article examines the surface interaction mechanisms of collector reagents and approaches to selecting the optimal collector scheme in the flotation of copper–molybdenum (Cu–Mo) sulfide minerals. Literature analysis and laboratory experiment results confirm that the chemical structure of collectors, sorption (adsorption) mechanisms on mineral surfaces, pH, oxidation state, and the use of depressants are crucial factors for enhancing flotation selectivity and optimizing concentrate quality. The recommended optimal scheme must be experimentally validated according to the mineral composition and industrial conditions.

**Keywords:** chalcopyrite, molibdenit, collectors, xanthate, dithiophosphate, adsorption, selectivity, depressant.

## KIRISH

Mis-molibden rudalaridan samarali Cu va Mo ajratib olish ko'plab konlar va metallurgiya korxonalarining asosiy vazifasidir. Ko'pincha bu jarayon flotatsiya yordamida bajariladi: mineral zarralari yuzasining gidrofoblashtirilishi va ko'pik yordamida yig'ilishi orqali qiymatli minerallar markazlashadi. Xalkopirit ( $\text{CuFeS}_2$ ) — misni olib beruvchi asosiy sulfid mineral hisoblanadi, molibdenit ( $\text{MoS}_2$ ) esa molibden manbai bo'lib, ularning birgalikda mavjudligi tenglama (Cu–Mo) boyitish jarayonini murakkablashtiradi. Molibdenit tabiiy ravishda nisbatan gidrofob tabiatga ega bo'lib, xalkopirit esa nasos kollektorlar talab qilishi mumkin; natijada Cu va Mo separat qilish murakkablashadi. Shu sababli, to'plovchi (collector) reagentlarning turini va ularning minerallar yuzasida qanday mexanizmlar bilan ishlashini yaxshi tushunish va optimal sxemani tanlash juda muhimdir. [1]

Adabiyotlar ko'rsatadiki, kollektorlarning ishlash mexanizmi kimyoviy va fizik komponentlardan iborat bo'lib, xantatlar, ditiofosfatlar va boshqa sulfid-yo'naltirilgan organik molekulalar xalkopirit yuzasida kimyoviy kompleks hosil qilishi yoki fizik-kimyoviy sorbsiya orqali ushlanishi mumkin. Kollektor va depressorlardan foydalangan holda selektiv ayrimlashtirishga erishish mumkin, ammo bu jarayon minerallar yuzasi, pH, oksidlanish darajasi va agentlarning dozalariga bog'liq [2].

### Adabiyotlar sharhi

Kollektorlar kimyoviy jihatdan sulfid mineral yuzalariga adsorbsiya qilinadi va, xususan, xantatlar xalkopirit bilan kimyoviy reaksiyaga kirishib, metall–xantat komplekslarini hosil qiladi — natijada yuzada organik kislotalar qoldig'i bilan gidrofob faza yuzaga keladi. Xantatlar adsorbsiya mexanizmi uch yo'lda sodir bo'lishi mumkin: fizik adsorbsiya, kimyoviy sorbsiya (metal-organik kompleks) va diksantogen hosil bo'lishi orqali (oksidlash sharoitida). [3]

Ditiofosfatlar va ditiofosfinatlar (DTP, DTPI) xalkopirit yuzasida kuchli adsorbsiya ko'rsatishi va ba'zi hollarda xantatlarga nisbatan yuqori selektivlik berishi mumkin — bu ularning poliar guruhlar va fosfor bilan bog'liq mexanizmlar bilan izohlanadi [4].

Molibdenit ( $\text{MoS}_2$ ) — lamellar (plyonal) tuzilishga ega bo'lib, tabiiy ravishda gidrofob bo'ladi va aralash xalkopirit bilan oddiy flotatsiyada birga olinishi mumkin. Shu bois Cu–Mo separelash strategiyalari ikki bosqichli bo'lishi mumkin: avval bulk yoki molibdenitni birinchi bosqichda ajratib olish (equal floatability yoki molybdenitni birinchi bosqichdagi prioritet floatatsiyasi), keyin qoldiqdan xalkopirit'ni oladigan kuchli kollektor qo'llash kabi yondashuvlar mavjud. Depressorlardan (masalan,  $\text{Na}_2\text{S}$ , lignosulfonatlar, STG va yangi organik depressorlar) xalkopirit yoki molibdenitni maqsadga muvofiq bostirishda foydalaniladi [5].

Yaqinda nashr etilgan sharhlar kollektor molekulalarining molekulyar dizayni (molekulaning og'irligi, hidrofob guruhining uzunligi, poliar/funksional guruhlar) va yuzaviy modifikatsiyalar orqali flotatsiya selektivligini oshirish yo'llariga urg'u bermoqda [6].

### Maqsad va tadqiqot savollari

Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi — mis-molibden rudasini flotatsiyalashda kollektorlarning yuzaga ta'sir mexanizmining analitik tahlili asosida optimal kollektor variantini tanlash bo'yicha tavsiyalar ishlab chiqishdir. Tadqiqot quyidagi savollarga javob beradi:

Kollektorlarning xalkopirit va molibdenite yuzasidagi asosiy adsorbsiya mexanizmlari qanday? [3].

Qaysi kollektor kimyoviy jihatdan xalkopirit uchun afzal — xantatmi yoki ditiofosfatmi [4].

Selektivlikni oshirish uchun depressorlar va pH qanday integratsiyalangan sxema bo'yicha qo'llanilishi kerak? [5].

Optimal variantni laboratoriya va pilot-miqyosda qanday aniqlash tavsiya etiladi?

### **Metod**

Ushbu maqola — sistematik adabiyotlar tahlili va mavjud eksperimental tadqiqotlar natijalariga asoslangan sintez hisoblanadi. Shuningdek, maqolada sanoat va laboratoriya tajribalarini rejalashtirish uchun tavsiyalar berildi. Metodologiya quyidagilarni o'z ichiga oladi:

**Adabiyotlar tanlovi:** So'nggi 20 yil ichidagi sharh maqolalari, Bulatovichning qo'llanmasi va so'nggi tajriba ishlari (2014–2025) o'rganildi. Maqolalar tanlovida eksperimental ma'lumotlar, yuzaviy kimyo tahlillari (XPS, FTIR, TOF-SIMS), kontakt burchaklari va zeta potensial o'lchovlari, hamda flotatsiya natijalari (recovery, grade) ustuvor qilindi [2].

**Mexanistik tahlil:** Kollektor-mineral o'zaro ta'siri — kimyoviy kompleks hosil bo'lish, elektron almashinuvi, oksidlanish va fizik adsorbsiya nuqtai nazaridan baholandi. Ushbu tahlil adabiyotlardagi XPS/FTIR/TOF-SIMS ma'lumotlariga tayandi [7].

**Optimal variant tanlash protokoli (tavsiya):** laboratoriya-miqyosidagi seriyali flotatsiya testlari (single mineral, mixed mineral, bulk flotation, selektive flotation), adsorbsiya izotermalari, kontakt burchaklari, zeta-potensial, va qiyosiy kimyoviy tahlillar asosida amalga oshirilishi lozim. Jarayon parametrlari: pH, oksidlanish (ORP), kollektor dozaslari, depressor turi va dozalari, maydalanish darajasi [8].

### **Natijalar**

Quyida adabiyotlar va tajriba ishlari asosida olingan asosiy natijalar jamlandi.

#### ***Kollektorlar mexanizmi haqida asosiy xulosalar***

**Xantatlar** xalkopirit yuzasida kimyoviy reaksiyalar orqali metall-xantat komplekslarini hosil qiladi; bu jarayon oksidlanish va pH ga sezgir. Xantat adsorbsiya jarayoni uch xil uslubda yuz beradi: fizik adsorbsiya, kimyoviy (chemisorbsiya) va diksantogen hosil bo'lishi orqali. Bu mexanizm flotatsiya kinikasini va selektivlikni belgilaydi [3].

**Ditiofosfatlar (DTP/DTPI)** ko'pincha xalkopirit uchun mustahkamroq adsorbsiya ko'rsatadi va ba'zida xantatlarga nisbatan selektivlikni yaxshilaydi. Ularning sirt-faollik va koordinatsion bog'lanish xususiyatlari buni izohlaydi [4].

**Molibdenit** tabiatan gidrofob bo'lib, oddiy neftiy kollektorlarni talab qilmaydi; ammo u bilan birga xalkopirit ham float bo'lib qolishi sababli selektivlik qiyinchiliklari paydo bo'ladi. Shuning uchun molibdenitni birinchi bosqichda olish yoki xalkopiritni depressorlar orqali bostirish amaliy yechim hisoblanadi [5].

#### ***Depressorlar va selektivlik***

Depressorlar xalkopirit yoki boshqa keraksiz minerallarni selektiv tarzda gidrofil holga keltirib, ularning floatatsiyasini kamaytiradi. Na<sub>2</sub>S, lignosulfonatlar, STG, va yangi organik depressorlar turli sharoitlarda samarali ekanligi guvohlangan. Yaqinda kashf etilgan MMO kabi yangi molekularlar xalkopiritni kuchli bosuvchi ta'sir ko'rsatishi, lekin molibdenitga kam ta'sir qilishi ko'rsatildi — bu selektivlikni oshirishga imkon beradi [7].

#### ***Parametrlar ta'siri***

**pH:** xalkopirit va molibdenitning yuzaviy kimyoviy xulq-atvori pH ga juda sezgir; xususan xantatning adsorbsiyasi yuqori pHda odatda oshishi mumkin, lekin oksidlanish va gidroksil-guruhlarining paydo bo'lishi bilan murakkablashadi [3].

**Oksidlanish (ORP):** xalkopirit yuzasining oksidlanishi kollektor bilan reaksiyani o'zgartiradi; ba'zi hollarda oksidlangan qatlam xantatning kimyoviy bog'lanishini osonlashtirishi yoki aksincha kamaytirishi mumkin [3].

#### **Taklif etilayotgan optimal variantni tanlash protokoli**

Adabiy va eksperimental natijalarga asoslanib, quyidagi bosqichli protokolni tavsiya qilamiz:

**Mineralografik tahlil** — ruda namunalarini minerallar tarkibi, zarralar o'lchami, xalflanish (liberation) darajasi va pyrit/okidlash darajasini aniqlash. (SEM, XRD, QEMSCAN).

**Single-mineral flotatsiya testlari** — toza xalkopirit va molibdenit namunalarida xantat, DTP va boshqa kollektorlarning individual ta'sirini o'rganish. Adsorbsiya izotermalari, kontakt burchak va zeta-potensial o'lchashlar [9].

**Mixed mineral va bulk flotatsiya testlari** — haqiqiy ruda sharoitida bir nechta kollektor va depressor kombinatsiyalarini sinovdan o'tkazish. Bosqichli (molibdenit birinchi, so'ngra mis) yondashuvni sinab ko'rish [6].

**Optimallashtirish va kinetika tahlili** — kollektor dozasini o'zgartirib, flotatsiya kinetikasini (recovery-time curves) qurish va iqtisodiy baholash [8].

**Pilot-scale tasdiqlash** — laboratoriya natijalari asosida pilot miqyosidagi sinovlarni (circuit-scale) o'tkazish, reagent sarfini aniqlash hamda mahsulot sifatini tekshirish.

**Sanoat joriy etish va monitoring** — real fabrikada onlayn ORP, pH va flotatsiya samaradorligini monitoring qilish va reagent dozasini adaptiv boshqarish.

#### **Muhokama**

Yuqorida bayon etilganlar shuni ko'rsatadiki, kollektorlarning "eng yaxshi" turi universal emas — u ruda xususiyatlariga, texnologik oqimga va iqtisodiy mezonlarga bog'liq. Bulatovichning qo'llanmasi va so'nggi tadqiqotlar (jumladan, kollektor molekularining mukammal dizayni) kollektor tanlash jarayonida quyidagi prinsiplarga rioya qilishni tavsiya qiladi: funksional guruhning selektivligi, hidrofob guruhining yetarliligi, molekula barqarorligi va ekologik-xavfsizlik [2].

Xalkopirit va molibdenitni samarali ajratishda ikki asosiy yondashuv paydo bo'ladi: (1) molibdenitni birinchi navbatda yuqori selektiv bilan ajratish va keyin misni tiklash; yoki (2) avval misni ajratib, kalan moddadan molibdenit olish. Har ikki yondashuvda depressorlar va kollektorlarning o'zaro ta'siri muhim. Depressor sifatida  $\text{Na}_2\text{S}$  va lignosulfonatlar ko'plab amaliy holatlarda ishlatiladi, ammo yangi molekularlar (masalan, MMO) xalkopiritni cheklovchi sifatida yuqori selektivlik ko'rsatishi mumkin — ularni yanada kengroq tadqiq etish tavsiya etiladi [5].

Amaliy jihatdan, optimal kollektor varianti — odatda kombinatsiyalangan (xantat + ditiofosfat yoki xantat + naftalin sulfonat kabi) yoki strukturali modifikatsiya qilingan kollektorlar bo'lib chiqadi; ular xalkopirit uchun yuqori adsorbsiya va molibdenit uchun kam ta'sir ko'rsatishi kerak. Molibdenit qisman lamellar tabiatga ega bo'lgani uchun uning yuzasini kimyoviy o'zgartirish (oksidlanish yoki pastevali qoplamalar) orqali uni vaqtinchalik gidrofil qilish ham texnologik imkoniyatdir [10].

#### **Xulosa va takliflar**

Kollektorlarning asosiy ta'sir mexanizmi — mineral yuzasida fizik va kimyoviy adsorbsiya orqali gidrofoblik hosil qilishdir; xantatlar xalkopirit bilan kimyoviy kompleks hosil qiladi, ditiofosfatlar esa ba'zi sharoitlarda yuqori selektivlik ko'rsatadi [3].

Molibdenitning tabiiy gidrofobligi uni oddiy flotatsiyada qiyinchilik bilan xalkopirit bilan ajratishga sabab bo'ladi; depressorlardan va bosqichli floatatsiyadan foydalanish talab etiladi [5].

Optimal kollektor variantini tanlash uchun laboratoriya-miqyosdan boshlab pilot-miqyosgacha bo'lgan bosqichli protokol (single-mineral → mixed → bulk → pilot) qo'llanishi kerak [8].

Yangi molekulyar dizaynli kollektorlar va depressorlar (molekulyar maqsadli depressorlar) selektivlikni oshirish istiqbollarini ochmoqda; ularning sanoat tatbiqi uchun qo'shimcha tadqiqotlar zarur [11].

**Tavsiya:** Bizning konlarimiz uchun eng maqbul kollektor/depressor kombinatsiyasini aniqlashda yuqoridagi protokol bo'yicha konkret laboratoriya-va pilot-sinovlarni o'tkazish zarur — faqat shunda iqtisodiy va ekologik jihatlar bilan optimal variant tasdiqlanadi.

#### Foydalanilgan adabiyotlar

1. R. González-Fernández, A. Ruiz-Cabezas, M. C. Medina Domínguez, A. B. Subía-Álava, va J. L. Delgado Salazar, "Teachers' Teaching and Professional Competences Assessment," *Evaluation and Program Planning*, vol. 103, art. no. 102396, 2024, doi: 10.1016/j.evalprogplan.2023.102396.
2. S. M. Bulatovic, *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice: Volume 3: Flotation of Industrial Minerals*, 1st ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2014.
3. C. I. Castellón, "Froth Flotation of Xalkopirit/Pyrite Ore: A Critical Review," *Materials*, vol. 15, no. 19, art. no. 6536, 2022.
4. T. Güler, "Adsorption of Dithiophosphate and Dithiophosphate on Xalkopirit: Electrochemical Behaviour and Selective Thiol Adsorption," *Minerals Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 35–43, 2006.
5. J. Hao, J. Liu, Y. Yu, H. Gao, X. Xiaoyan, X. Bai, "Depressants for Separation of Xalkopirit and Molibdenit: Review and Prospects," *Minerals Engineering*, vol. 191, art. no. 108209, 2023, doi: 10.1016/j.mineng.2023.108209.
6. G. Ai, G. Xiao, and B. Feng, "Flotation Separation of Xalkopirit and Molibdenit by Eco-Friendly Microorganism Depressant *Bacillus tropicus*," *Minerals*, vol. 15, art. no. 762, 2025, doi: 10.3390/min15070762.
7. X. Lv, A. Luo, X. Tong, J. Chen, va S. Jian, "Experimental and Mechanistic Study on Flotation Separation of Xalkopirit and Molibdenit Using the Novel Depressant 2-Mercapto-6-Methylpyrimidin-4-ol," *Molecules*, vol. 30, no. 6, art. 1396, 2025, doi:10.3390/molecules30061396.
8. T. D. S. Perera, T. Hsia, C. Ritchie, and S. H. Thang, "Flotation Efficiency and Surface Adsorption Mechanism on Xalkopirit and Pyrite by a Novel Cardanol-Derived Collector," *Minerals Engineering*, vol. 198, art. no. 108566, 2024, doi:10.1016/j.mineng.2023.108566.
9. R. Ahmadi, E. Ravanasa, and Y. Mirzapour, "Exploring mechanism of xanthate adsorption on xalkopirit surface: An atomic force microscopy study," *Journal of Mining and Environment (JME)*, vol. 9, no. 4, pp. 1009–1018, 2018. doi: 10.22044/jme.2018.7173.1570.
10. X. Ma, L. Xia, S. Wang, H. Zhong, Q. Lin, "The Structural Modification of Xanthate Collectors to Enhance the Flotation Selectivity of Xalkopirit," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 56, no. 21, pp. 5917–5925, May 2017. doi: 10.1021/acs.iecr.6b04566.

11. *Xalkopirit Flotation, Molecular Design and Smart Industry: A Review, International Journal of Molecular Sciences*, vol. 26, no. 8, art. no. 3613, 2025. doi: 10.3390/ijms26083613.
- 12.