


УДК: 622.7

 10.70769/3030-3214.SRT.3.4.2025.31

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕСТНЫХ РЕАГЕНТОВ ПРИ ФЛОТАЦИИ МЕДНО-МОЛИБДЕНОВЫХ РУД



Халимов Шохрух Комиљон угли

Каршинский государственный технический университет,
докторант, Кариш, Узбекистан
E-mail: xalimovshohrux7700@gmail.com
ORCID ID: 0009-0001-7206-6987



Саидахмедов Актам Абдисамиевич

Доцент, DSc, Навоийский Государственный Горно-
технологический Университете, Навои, Узбекистан
E-mail: aktam.saidaxmedov@bk.ru
ORCID ID: 0000-0002-0482-3413

Аннотация. В статье рассматриваются принципы флотации медно-молибденовых руд, роль основных групп реагентов и возможности применения «местных» (локально доступных, импортозамещающих или полученных из побочных сырьевых потоков) реагентов. Обсуждаются преимущества и ограничения таких реагентов, методы оценки их эффективности (микрофлотация, аналитические методы), экономические и экологические аспекты, а также практические рекомендации для внедрения на обогатительных фабриках. Основной упор – на обеспечение селективности при разделении халькопирита и молибденита, снижении затрат и минимизации экологического воздействия.

Ключевые слова: флотация, медно-молибденовые руды, реагенты, растительные масла, силикатные добавки, селективность, устойчивые технологии.

MIS-MOLIBDEN RUDALARINI FLOTATSIYALASHDA MAHALLIY REAGENTLARDAN FOYDALANISH TAHLILI

Xalimov Shoxrux Komiljon o'g'li

Qarshi davlat texnika universiteti, doktorant, Qarshi, O'zbekiston

Saidahmedov Aktam Abdisamiyevich

Navoiy davlat konchilik va texnologiya universiteti dotsenti, DSc,
Navoiy, O'zbekiston

Annotatsiya. Maqolada mis-molibden rudalarini flotatsiya qilish tamoyillari, asosiy reagent guruhlarining roli va "mahalliy" (import o'rnini bosuvchi yoki qo'shimcha xomashyo oqimlaridan olingan mahalliy mavjud) reagentlarni qo'llash imkoniyatlari ko'rib chiqiladi. Bunday reagentlarning afzalliklari va cheklovlari, ularning samaradorligini baholash usullari (mikroflotatsiya, analitik usullar), iqtisodiy va ekologik jihatlar, shuningdek, boyitish fabrikalarida joriy etish bo'yicha amaliy tavsiyalar muhokama qilinadi. Asosiy e'tibor xalkopirit va molibdenitni ajratishda selektivlikni ta'minlash, xarajatlarni kamaytirish va ekologik ta'sirni minimallashtirishga qaratilgan.

Kalit so'zlar: flotatsiya, mis-molibden rudalari, reagentlar, o'simlik moylari, silikat qo'shimchalar, selektivlik, barqaror texnologiyalar.

ANALYSIS OF THE USE OF LOCAL REAGENTS IN THE FLOTATION OF COPPER-MOLIBDENIC ORES

Khalimov Shokhrux Komiljon ugli

Karshi State Technical University, PhD student, Karshi,
Uzbekistan

Saidahmedov Aktam Abdisamiyevich

Associate Professor, Navoi State University of Mining and
Technology, DSc, Navoi, Uzbekistan

Abstract. The article examines the principles of flotation of copper-molybdenum ores, the role of the main groups of reagents, and the possibilities of using “local” (locally available, import-substituting, or derived from secondary raw material flows) reagents. The advantages and limitations of such reagents, methods for evaluating their effectiveness (microflotation, plate flotation, analytical methods), economic and environmental aspects, and practical recommendations for implementation in processing plants are discussed. The main focus is on ensuring selectivity in the separation of chalcopyrite and molybdenite, reducing costs and minimizing environmental impact.

Keywords: flotation, copper-molybdenum ores, reagents, vegetable oils, silicate additives, selectivity, sustainable technologies.

Введение. Флотация остаётся основным методом обогащения породообразующих медно-молибденовых руд. Традиционно для получения концентратов используются классические коллекторы (ксантаты, дитиофосфаты, меркаптобензотиазолы), пенообразователи (поверхностно-активные спирты и алифатические соединения) и модификаторы (депрессанты, активаторы) в определённых режимах. В последние годы возрос интерес к поиску местных/импортозамещающих и более экологических реагентов: состав комбинированных коллекторов, биореагентов (растительные экстракты, биоповерхностно-активные вещества), а также композиты, изготовленные из промышленных отходов и доступных региональных сырьевых источников. Такие подходы потенциально снижают затраты и логистические риски, но требуют тщательной проверки селективности и устойчивости в промышленных условиях.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования рассматривалась порфировая медно-молибденовая руда Алмалыкского месторождения. Минералогический состав: халькопирит, молибденит, пирит, кварц, полевые шпаты. Среднее содержание меди – 0,4%, молибдена – 0,02%. Для моделирования флотационного процесса применялись как стандартные реагенты (бутилксантат, МИБК, Na_2SiO_3), так и местные заменители — смеси растительных масел (рапсовое, подсолнечное) и природные силикатные материалы. Оценка эффективности проводилась по показателям извлечения Cu и Mo, а также по индексу селективности.

Минералогические и технологические основы разделения Cu–Mo. Чтобы оценить применимость местных реагентов, нужно

учитывать минералогию сырья и технологическую схему. В типичных порфирных системах основными компонентами являются: халькопирит (CuFeS_2) – основной источник меди, молибденит (MoS_2) – основной минерал молибдена, пирит и кислые/окисные минералы. Молибденит, естественно, более гидрофобен и легко всплывает, однако ассоциации с медными сульфидами и поверхность, изменённая окислением, усложняют селективность. Классический подход – последовательная флотация: сначала выделение медного концентрата (иногда в несколько стадий), затем флотация молибденита с депрессией меди (или наоборот, в зависимости от схемы). Выбор реагентов направлен на достижение высокой извлечённости и селективности при минимальной потере взаимосвязанных компонентов [1].

Результаты и обсуждение.
Классификация и функции реагентов при флотации Cu–Mo. Коллекторы повышают гидрофобность целевых минералов. Для медных минералов широко применяют ксантаты (амил-, бутил- и др.), дитиофосфаты и меркаптобензотиазолы как вторичные коллекторы; молибдениту иногда добавляют сильные коллекторы (например, бутилксантат) или используют схему так, чтобы молибденит всплывал на втором этапе. Выбор коллектора сильно влияет на селективность: сильные коллекторы для молибденита могут ухудшать разделение с медью [2].

Пенообразователи – алифатические спирты, полиалкилполиэтиленгликоли и др. – отвечают за устойчивость пены и кинетику флотации. Некорректный выбор пенообразователей может ухудшать селективность и приводить к высоким потерям.

Депрессанты (крахмалы, каррагинан,

NaCN, ZnSO₄ и др.) применяются для подавления нежелательных минералов (пирит, железосодержащие фракции) или для селективного подавления молибденита/меди при соответствующих схемах. Активаторы (Cu²⁺ и пр.) иногда используются для активации определённых минералов. Правильная комбинация регуляторов критична для достижения требуемой селективности [3].

«Местными реагентами» в контексте этой статьи понимаются вещества, которые: производятся в регионе (импортозамещение), или получены из доступного местного сырья или отходов (например, нефтеперерабатывающие остатки, растительные масла, сельскохозяйственные побочные продукты), или представляют собой простые модификации известных молекул с использованием локальных химикатов.

Цель использования – сокращение логистических затрат, повышение устойчивости поставок, уменьшение углеродного следа и, при благоприятных условиях, снижение токсичности. Однако «местный» не всегда значит «лучше»: необходимо оценивать чистоту, стабильность, воспроизводимость состава и влияние на оборудование и окружающую среду [3].

Направления разработки местных реагентов. Исследования показывают, что можно создавать эффективные композиционные коллектора/пенообразователи, комбинируя доступные соединения (ксантаты, тио- или дитиофосфаты) с суррогатами (минорные поверхностно-активные вещества из нефтехимии, остатки маслоочистки). Такие композиции иногда улучшают стабильность пены и обеспечивают желаемую кинетику флотации. Примеры лабораторных работ в Казахстане и соседних регионах демонстрируют потенциал импортозамещающих композиций [4].

Растительные масла (соевые, касторовые, отработанные растит. масла) и экстракты (алоэ, каррагинан, целлюлозные производные) исследуются как пенообразователи и модификаторы поверхности. Биореагенты обещают лучшую биоразлагаемость и более низкую токсичность, однако их состав может значительно варьировать между партиями, что требует

стандартизации и, возможно, химической модификации для стабильной работы. Последние исследования также рассматривают биосурфактанты, продуцируемые микроорганизмами, как перспективную «зелёную» альтернативу [5].

Для селективной депрессии молибденита или меди разрабатывают полимерные депрессанты на базе доступных полисахаридов (каррагенан, крахмал) и целлюлозных производных. Эти вещества дешевле и экологичнее синтетических аналогов, но требуют изучения механизма взаимодействия с поверхностями минералов. Новые исследования показывают, что каррагинан, например, может селективно депрессировать молибденит в присутствии ксантатов при определённых условиях.

Лабораторное и пилотное тестирование местных реагентов. Для оценки новых/местных реагентов обычно используют комбинацию методов: микрофлотация (Hallimond cup), лабораторные флотационные машины (например, 1–2 л), аналитические методы (XRD, SEM, FTIR для изучения адсорбции), ζ-потенциал и кинетические испытания. Важные показатели – извлечённость, содержание целевого минерала в концентрате, селективность, скорость всплывания и стабильность пены.

Проблемы применения в промышленности. Успешные лабораторные результаты не всегда воспроизводятся на фабрике: отличия в минералогии партии, наличии органических загрязнений, составе воды и гидромеханике оборудования могут приводить к иным результатам. Поэтому необходимы пилотные полёты и этапы масштабирования: от 1–5 м³ до полно-размерных секций с отслеживанием долгосрочного поведения реагента (накопление в циркуляционных потоках, деградация, взаимодействие с металлами и осадками) [6].

Экономика и логистика внедрения местных реагентов. Ключевые факторы экономической оценки: себестоимость реагента (сырьё + переработка), стабильность поставок, влияние на производительность (извлечённость, выход концентрата), затраты на утилизацию хвостов и экологические сборы. Локальные реагенты выигрывают по логистике и, часто, по цене при массовом применении; но требуется

учёт издержек на стандартизацию, очистку и возможную модернизацию дозирующего оборудования. Рискованным может быть использование нестабильных биосырьев без системы контроля качества.

Экологические и нормативные аспекты.

Местные реагенты часто позиционируют как более экологичные, но это не всегда так: некоторые производные растительных масел или побочных нефтепродуктов могут содержать токсичные примеси (ПАУ, замещённые фенолы), требующие очистки. Необходимо оценивать биоразлагаемость, токсичность для аквакультуры, образование стойких эмульсий в хвостохранилищах и возможное взаимодействие с очистными сооружениями. Соответствие местным экологическим нормам и требованиям к сбросам – обязательное условие внедрения.

Технические рекомендации для применения местных реагентов на обогащательных фабриках:

- **минералогическая разведка:** перед вводом реагента провести детальную минералогическую (QEMSCAN/MLA, SEM, XRD) для понимания ассоциаций Cu–Mo и наличия примесей (арсен, висмут и др.).

- **лабораторное тестирование:** серия микрофлотаций, определение кинетики, дозировки, взаимодействий с обычными регуляторами; сравнение с эталонными коммерческими реагентами (контроль).

- **пилотное масштабирование:** полевые пилоты на секции фабрики или в мобильной флотационной установке с учётом реальной воды и гидромеханики.

- **мониторинг и стандартизация:** разработать процедуры контроля качества сырья реагента (ГОСТ/внутренние стандарты), тесты стабильности партии, анализ остатков и токсичности.

- **оценка жизненного цикла:** учесть все стадии (производство, использование, утилизация).

Результаты исследований:

- В ряде исследований по Казахстану и России были предложены композиционные реагенты, показывающие сопоставимую извлекаемость при относительном снижении

стоимости (лабораторные данные).

- Работы последних лет демонстрируют потенциал биореагентов (каррагинан, целлюлозные производные) в роли селективных депрессантов молибденита или меди; однако необходимы дальнейшие промышленные испытания.

- Новые составы коллектора/фротов, коммерчески выдаваемые как «специальные» (например, ряд продуктов Danafloat и Orica), позволяют улучшать селективность; их схемы могут быть адаптированы с использованием местных компонентов как сырья для синтеза.

Результаты моделирования показали, что применение растительных масел в качестве собирателей обеспечивает сравнимое извлечение меди (до 88–90%) при одновременном снижении токсичности и стоимости реагентной схемы. Использование местных силикатных добавок в качестве депрессоров пирита позволило повысить селективность разделения Cu–Mo.

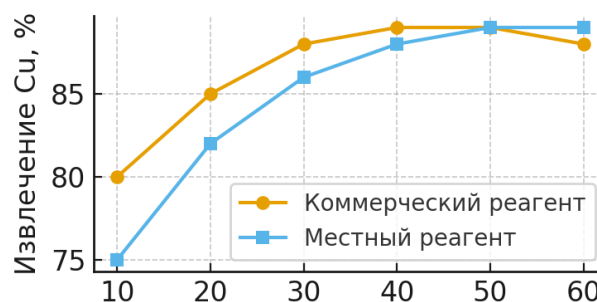


Рис. 1. Зависимость извлечения меди от дозировки реагента.

Таблица 1.

Сравнение коммерческих и местных реагентов

| Показатель | Коммерческий реагент | Местный реагент | Комментарий |
|------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|
| Стоимость, \$/т | 2000 | 900 | Снижение расходов на 55-60% |
| Извлечение Cu, % | 89 | 88 | Сопоставимая эффективность |
| Извлечение Mo, % | 82 | 81 | Без существенных потерь |
| Токсичность | Высокая | Низкая | Биоразлагаемые компоненты |
| Экологичность | Средняя | Высокая | Минимизация отходов |

Ограничения и направления дальнейших исследований:

- Необходимы долгосрочные исследования стабильности и накопления продуктов

разложения в замкнутых циклах водоснабжения;

- Изучение молекулярных механизмов адсорбции местных полимеров/экстрактов на поверхности халькопирита и молибденита (FTIR, AFM, ζ -потенциал) поможет целенаправленно оптимизировать составы;

- Разработка стандартизированных протоколов качества для биореагентов (снижение вариабельности между партиями);

- Оценка экологической совместимости с современными системами очистки и хвостохранилищами.

Заключение. Местные реагенты – перспективное направление для снижения затрат и повышения устойчивости поставок в обогательном производстве медно-молибденовых руд.

Успешное применение требует комплексного подхода: минералогическая разведка, лабораторные и пилотные испытания, стандартизация качества и экологическая оценка.

Наиболее многообещающие направления: композитные коллекторы на базе локальных химикатов, биореагенты как фротеры/депрессанты и модифицированные полимеры из доступного сырья.

Ключевой риск – вариабельность качества биосырья и потенциальные скрытые примеси в побочных продуктах. Поэтому внедрение должно сопровождаться строгим контролем и этапами масштабирования.

Проведённый анализ показывает, что использование местных реагентов на основе растительных масел и силикатных добавок является перспективным направлением повышения экологичности и экономичности флотации медно-молибденовых руд. Предложенные реагентные схемы могут быть адаптированы к условиям действующих фабрик Алмалыкского ГМК. Дальнейшие исследования рекомендуется проводить в рамках пилотных испытаний для уточнения оптимальных дозировок и условий флотации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Orica Mining Chemicals, Teague, A., O’Leary, S., Lee, K., Petrovic, E., Craven, J., JKTech, OZ Minerals, Murdoch University, Metcon Laboratories, & Weir Minerals Australia Ltd. (2009). Flotation guidebook. Orica Mining Chemicals. https://www.ausimm.com/globalassets/insights-and-resources/minerals-processing-toolbox/omc_flotation_guidebook.pdf
- [2] Rios, L. A., Barraza, M. J., Robles, P. A., & Quezada, G. R. (2025). Chalcopyrite flotation, molecular design and smart industry: A review. International Journal of Molecular Sciences, 26(8), 3613. <https://doi.org/10.3390/ijms26083613>
- [3] Negmatova, K., Ikramova, M., Khursanov, A., Negmatov, S., Abed, N., & Negmatov, J. (2022). Development of composite chemical flotation reagents and their application in the process of flotation of copper-molybdenum ores. AIP Conference Proceedings, 2471, 050053. <https://doi.org/10.1063/5.0090794>
- [4] Vasumathi, N., Sarjekar, A., Chandrayan, H., Chennakesavulu, K., Reddy, G. R., Kumar, T. V. V., El-Gendy, N. S., & Gopalkrishna, S. J. (2023). A mini review on flotation techniques and reagents used in graphite beneficiation. International Journal of Chemical Engineering, 2023, Article 1007689. <https://doi.org/10.1155/2023/1007689>
- [5] Yi, G., Macha, E., Van Dyke, J., Macha, R. E., McKay, T., & Free, M. L. (2021). Recent progress on research of molybdenite flotation: A review. Advances in Colloid and Interface Science, 295, 102466. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102466>
- [6] Semushkina, L., Abdykrova, G., Turysbekov, D., Narbekova, S., & Kaldybayeva, Z. (2021). On the possibility to process copper-molybdenum ore using a combined flotation reagent. Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources, 319(4), 57–64. <https://doi.org/10.31643/2021/6445.41>