

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ФЛОТАЦИИ СМЕШАННЫХ
МЕДНЫХ РУД**

Турдиев Шахбоз Шермамат угли
д.т.н., доц. Каршинский инженерно-экономический институт
<https://orcid.org/0000-0002-4116-9799>

Эшонкулов Учкун Худайназар угли
д.т.н., доц. Каршинский инженерно-экономический институт
<https://orcid.org/0009-0002-8415-7218>

Маллаев Шамшод Обиджон угли
Каршинский инженерно-экономический институт

Аннотация

В данной статье рассматриваются основные принципы флотации медных руд, их классификация и технологические особенности переработки. Анализируются методы обогащения, включая коллективную и селективную флотацию, а также влияние текстурных характеристик руды на выбор технологической схемы. Приведены данные по основным медьсодержащим минералам, реагентам, используемым в процессе флотации, и характеристикам получаемых концентратов. Рассматриваются современные тенденции и перспективы развития технологий флотации медных руд.

Ключевые слова: флотация, медные руды, обогащение, сульфидные минералы, ксантогенаты, селективная флотация, коллективная флотация, реагенты, медный концентрат, переработка руд.

Introduction

Флотация является одним из наиболее распространенных методов обогащения руд цветных металлов, в том числе медных. Данный процесс основан на различии физико-химических свойств минералов, в частности их способности смачиваться водой. В современной промышленности флотация применяется для выделения медных минералов из руд различного состава и текстурных особенностей.

Медные руды подразделяются на массивные и вкрапленные, что определяет выбор технологической схемы переработки. В зависимости от содержания меди в сырье применяются коллективные, селективные и коллективно-селективные методы флотации. Важным аспектом является использование реагентов, таких как ксантогенаты и дитиофосфаты, позволяющих добиться высокой степени извлечения меди.

Целью данной статьи является анализ современных методов флотации медных руд, изучение влияния состава руды на выбор схемы переработки, а также рассмотрение перспективных технологий обогащения.

Флотация (франц. flottstion, от flotter - плавать на поверхности воды) - это метод обогащения, основанный на различии физико-химических свойств поверхности

материалов, их способности смачиваться водой. Одни минералы (гидрофобные) в тонкоизмельченном состоянии в водной среде не смачиваются водой, прилипают к вводимым в воду пузырькам воздуха и всплывают с ними на поверхность, другие минералы (гидрофильные) смачиваются водой не прилипают к пузырькам воздуха и остаются в объеме пульпы.

Из ста семидесяти известных на данный момент медьсодержащих минералов в промышленных масштабах используется около семнадцати (таблица 1). Практически во всех медьсодержащих рудах, так же как и в полиметаллических, имеются сульфиды железа (таблица 2).

Таблица 1.

Характеристика основных медных материалов

Минерал	Формула	Массовая доля Cu, %	Плотность, г/см ³	Твердость
Первичные сульфиды				
Халькопирит	CuFeS ₂	34,6	4,2	4
Вторичные сульфиды				
Халькозин	Cu ₂ S	79,9	5,8	3,0
Ковеллин	CuS	64,5	4,7	2,0
Борнит	Cu ₅ FeS ₄	63,3	5,3	3,0
Блеклые руды (сульфосоли)				
Тетраэдрит	Cu ₂ Sb ₄ S ₂	45-51	5,1	4
Теннантит	Cu ₂ As ₄ Si ₂	45-51	5,1	3,5
Оксиды				
Куприт	Cu ₂ O	88,8	6,2	4,0
Тенорит	CuO	79,9	6,4	4,0
Карбонаты				
Малахит	Cu ₂ (CO ₃)(OH) ₂	57,4	4,1	4,0
Азурит	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂	55,3	3,9	4,0
Силикаты				
Хризоколла	CuSiO ₃ *nH ₂ O	До 45	2,3	4
Сульфаты				
Халькантит	CuSO ₄ *5H ₂ O	25,4	2,2	2,5
Брошантит	Cu ₂ (SO ₄)(OH) ₆	34,8	3,8-3,9	4,0

Таблица 2.

Характеристика основных сульфидных минералов железа

Минерал	Формула	Массовая доля, %		Плотность г/см ³	Твердость
		Fe	Cu		
Пирит	FeS ₂	46,5	53,5	5,2	6,5
Марказит	FeS ₂	46,5	53,5	4,9	6,5
Пирротин	Fe1-xS	61,8	до 41	-	4,5

Для легкообогатимых руд с равномерной вкрапленностью медных минералов на фабриках небольшой производительности применяют обычно одностадийные схемы, которые

включают операции измельчения и классификации, основную флотацию, контрольную и одну–три перечистные.

На фабриках большой производительности получили распространение двухстадиальные схемы, по которым после I стадии измельчения до крупности 45–60 % класса –0,074 мм выделяются грубый медный концентрат и пиритсодержащие хвосты. Грубый медный концентрат доизмельчается до 85–95 % класса –0,074 мм и поступает на перечистные операции.

При переработке руд с высоким содержанием первичных шламов и растворимых солей флотацию целесообразно осуществлять в двух циклах – песковом и шламовом. При раздельной флотации создаются наиболее благоприятные условия для флотации крупных и мелких частиц – шламов (отходов продукта, составляющих пылевые и мелочные его части, получаемые в виде осадка при промывке какого-либо рудного материала), которые обычно повышают общий расход реагентов, подавляют флотацию крупных частиц, налипая на них, создают обильную и прочную пену.

Вкрапленные медные руды (медно-порфировые, медистые песчаники и жильные руды), отличающиеся невысоким содержанием пиритной серы и меди (0,4–2,0 %), в зависимости от содержания пирита могут перерабатываться с получением только медного концентрата или медного и пиритного концентратов. В первом случае применяется коллективная флотация, а во втором – коллективно-селективная или прямая селективная.

По текстурным особенностям медьсодержащие руды подразделяются на массивные, или сплошные, и вкрапленные.

Сплошные руды обычно более богатые, характеризуются высоким содержанием серы, представленной пиритом, в сростании с которым находятся сульфиды меди и цинка. Соотношение меди, цинка и серы, например, в сплошной медно-колчеданной руде достигает 1:1:20 (25).

Вкрапленные руды являются более бедными по содержанию цветных металлов, которое в рядовых рудах не превышает 1–2 %, а в бедных – 0,4–1,0 %. В зависимости от содержания меди в перерабатываемой руде медные руды условно подразделяются на богатые (более 2 % Cu), средние (0,8–2,0 % Cu), бедные (0,5–0,8 % Cu) и забалансовые (менее 0,3 % Cu). Богатые сульфидные руды, содержащие 2–3 % Cu, с высоким содержанием серы (35–42 %) могут иногда направляться непосредственно на плавку в шахтных печах. Однако в мировой практике в настоящее время 80 % Cu извлекается из концентратов, получаемых при обогащении медных руд.

Сульфидные минералы меди (халькопирит – CuFeS_2 , халькозин Cu_2S , ковеллин CuS , борнит Cu_5FeS_4) хорошо флотируются сульфидрильными собирателями (твердые кристаллические вещества имеют характерный запах, не обладают пенообразующими свойствами, что позволяет регулировать их расходы в широких пределах без нарушения процесса пенообразования) на основе двухвалентной серы в довольно широком диапазоне pH, так как они обладают высокой сорбционной способностью, которая зависит от степени окисленности сульфидной поверхности и содержания меди. По флотируемости ксантогенатами (солями ксантогеновой кислоты $\text{ROC}(=\text{S})\text{SH}$) медные минералы можно расположить в такой последовательности: халькопирит < борнит < ковеллин < халькозин.

Месторождения медно-порфировых руд по запасам меди являются самыми крупными. На их базе работают крупнейшие медно-обогатительные фабрики производительностью до 90 тыс. тонн руды в сутки и более. В основном к первичным медно-порфировым рудам относятся молибденит-халькопиритовые с невысоким содержанием (2–5 %) пирита. Основные технологические особенности обогащения этих руд:

- одностадийное измельчение до крупности 60–65 % класса –0,074 мм перед коллективной медно-молибденовой флотацией;
- доизмельчение черновых концентратов до 85–90 % класса –0,074 мм с получением богатых медных концентратов;
- создание в коллективной флотации поддерживается pH 10–12 подачей извести для подавления пирита (хотя для флотации молибденита оптимальное значение pH = 7,5–8,0). Наибольшее распространение для этих руд получила схема с доизмельчением промпродукта и переработкой его в отдельном цикле. Медно-порфировые руды (пирит, халькопирит, халькозин) перерабатываются на Алмалыкской и Балхашской фабриках (Узбекистан, Казахстан).

Для медных руд со средним содержанием пирита применяют как коллективно-селективные, так и прямые селективные схемы. При обогащении по коллективно-селективным схемам отделение медных минералов и пирита от минералов пустой породы происходит при грубом измельчении (до 45–50 % класса –0,074 мм), когда возможно получение хвостов с отвальным содержанием меди. Тогда по схеме коллективно-селективной флотации после измельчения до вышеуказанной крупности проводится коллективная флотация сульфидов меди и железа при pH не выше 7,5 (концентрация свободной CaO не превышает 20–50 г/м³). Получаемый коллективный медно-пиритный концентрат после доизмельчения до 80–95 % класса –0,074 мм перемешивается с известью при pH 12,0–12,5 (400–500 г/м³ свободной CaO) и цианидом для подавления пирита и направляется на медную флотацию. Хвосты контрольной медной флотации вкрапленных руд, как правило, содержат не более 30–35 % S, поэтому направляются на пиритную флотацию, которая проводится после удаления избыточной щелочности до pH 5–7.

В качестве собирателей сульфидных медных минералов применяются ксантогенаты (соли ксантогеновой кислоты ROC(=S)SH , средний расход обычно 10–30 г/т) и дитиофосфаты (10 г/т). Широко используется сочетание реагентов-собирателей. Например, при флотации медных руд за рубежом применяется реагент Z-200 (изопропилэтилтионокарбамат), который является наиболее селективным по отношению к пириту в сочетании с изопропиловым или амиловым ксантогенатами. Часто используется сочетание сульфгидрильных собирателей с аполярными (машинное масло, керосин и т.п.). В СНГ наибольшее распространение получил бутиловый ксантогенат ($\text{C}_5\text{H}_9\text{OS}_2\text{K}$), который применяется на всех медных фабриках.

Общая доля ксантогенатов, используемых на фабриках США, составляет ~60 %, дитиофосфатов – около 40 %. Подавители минералов пустой породы при флотации медных вкрапленных руд обычно не применяются. Но если в пульпе повышенное содержание шламов, то в основную медную флотацию и в перечистки медного концентрата добавляют жидкое стекло (до 0,4 г/т). Если же в руде присутствуют

окисленные медные минералы, то в измельчение и в основную медную флотацию подается сернистый натрий (200–300 г/т)

Требования, которым должны соответствовать медный и пиритный концентраты, представлены в таблице 3 и 4.

Таблица 3.

Требования по качеству медного концентрата

Марка концентрата	Содержание, %		
	Cu, не менее	примесей, не более	
		Zn	Pb
КМ-0	40	2	2,5
КМ-1	35	2	3
КМ-2	30	3	4
КМ-3	25	5	4,5
КМ-4	23	6	4,5
КМ-5	20	7	4,5
КМ-6	18	8	4,5
КМ-7	15	8,5	5,0
ППМ	12	11	8

Таблица 4.

Технические требования к пиритным концентратам, полученным при флотации сульфидных руд

Марка колчедана серного флотационного	Массовая доля, %		
	S, не менее	примесей, не более	
		Pb и Zn	влаги
КСФ-1	47	1	3,8
КСФ-2	45	1	3,8
КСФ-3	42	1	3,8
КСФ-4	38	1	3,8

Требования к получаемым медным и пиритным концентратам определяются в зависимости от типа руды и принятого метода их металлургической обработки.

Заключение: Флотация остается ведущим методом обогащения медных руд, обеспечивая высокие показатели извлечения меди. В зависимости от минерального состава руды применяются различные технологические схемы, включая коллективную и селективную флотацию. Использование эффективных реагентов и оптимизация условий процесса позволяют повысить качество получаемых концентратов.

Современные тенденции в области флотации медных руд направлены на совершенствование технологий, снижение затрат на реагенты и уменьшение воздействия на окружающую среду. Перспективными направлениями являются внедрение новых

типов реагентов, автоматизация процессов и развитие методов переработки бедных и комплексных руд.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Хасанов, А. С., Хакимов, К. Ж., Шодиев, А. Н., & Эшонкулов, У. Х. (2018). Уран и Золото. Мухофаза+ Ижтимоийсийосий, илмий-амалий ва бадий журнал, (01 (157)), 13.
2. Kh, E. U. (2023). TECHNOLOGY FOR OBTAINING REDUCED IRON FROM PYRITE CINDERS. Western European Journal of Modern Experiments and Scientific Methods, 1(4), 120-125.
3. Khasanov, A. S., Eshonqulov, U. X., & Khojiev Sh, T. (2022). Technology for the Reduction of Iron Oxides in Fluidized Bed Furnaces. Technology, 6(12), 23-29.
4. Эшонкулов, У. Х. У. (2022). ХАРАКТЕРИСТИКА И ТИПЫ ЖЕЛЕЗНЫХ СЫРЬ. BARQARORLIK VA YETAKCHI TADQIQOTLAR ONLAYN ILMIY JURNALI, 2(11), 303-308.
5. Хакимов, К. Ж., Эшонкулов, У. Х., & Умирзоков, А. (2020). Complex Processing Of Lead-Containing Technogenic Waste From Mining And Metallurgical Industries In The Urals. THE AMERICAN JOURNAL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY (TAJET) SJIF-5.32 DOI-10.37547/tajet, 2(9), 2689-0984.
6. Хасанов, А. С., Эшонкулов, У. Х., & Каюмов, О. А. (2023). ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ СЫРЬ И РУДЫ. BARQARORLIK VA YETAKCHI TADQIQOTLAR ONLAYN ILMIY JURNALI, 3(4), 291-298.
7. Хасанов, А. С., & Эшонкулов, У. Х. (2023). ПОДГОТОВКА ИСХОДНОГО ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ К ПЕРЕРАБОТКЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ. ARHITEKTURA, MUHANDISLIK VA ZAMONAVIY TEXNOLOGIYALAR JURNALI, 2(4), 34-46.
8. Eshonqulov, U. K. O. G. L., Umirzoqov, A. A., Khodjakulov, A. M., & Quziyev, H. J. (2021). DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGICAL SCHEME OF SAMPLE ENRICHMENT TITANIUM-MAGNETIC ORE OF THE TEBINBULAK DEPOSIT. Scientific progress, 2(7), 407-413.
9. Эшонкулов, У. Х., & Турдиев, Ж. Н. (2023). ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ШЛАМОВ. ARHITEKTURA, MUHANDISLIK VA ZAMONAVIY TEXNOLOGIYALAR JURNALI, 2(1), 32-36.
10. Эшонкулов, У. Х., Хасанов, А. С., & Хужакулов, А. М. (2022). НОВЫЕ СПОСОБЫ ОБОГАЩЕНИЯ КОНЦЕНТРАТОВ И ПРОЦЕССЫ ПОДГОТОВКИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ РУД. In Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья (pp. 119-125).
11. Abdurashid Khasanov, & Uchkun Eshonkulov. (2023). STUDY OF METHODS OF IRON SEPARATION FROM IRON-CONTAINING RAW MATERIALS. Best Journal of Innovation in Science, Research and Development, 2(11), 119–123. Retrieved from <https://www.bjisrd.com/index.php/bjisrd/article/view/818>

12. Турдиев, Ш. Ш., & Эшонкулов, У. Х. (2023). ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СОСТАВОВ ЦИНКОВЫХ ОТХОДОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКЕ. Наука и технология в современном мире, 2(18), 28-32.
13. Турдиев, Ш. Ш., & Эшонкулов, У. Х. (2023). ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ «КАЛЬМАКЫР». Наука и технология в современном мире, 2(18), 33-38.
14. Турдиев, Ш. Ш., & Эшонкулов, У. Х. (2023). СПОСОБЫ ОЧИСТКИ КОНЦЕНТРАТОВ ПЛАТИНОИДОВ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ. Наука и технология в современном мире, 2(18), 23-27.
15. Турдиев, Ш. Ш., & Эшонкулов, У. Х. (2023). РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКА КОНЦЕНТРАТОВ ЧЕРНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ХВОСТОВ МОФ-1 И МОФ-2 С КОМПЛЕКСНЫМ ИЗВЛЕЧЕНИЕМ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ. Наука и технология в современном мире, 2(18), 43-47.
16. Nasirov, U., Umirzokov, A., Nosirov, N., Fatkhiddinov, A., Eshonkulov, U., & Kushnazorov, I. (2024). Study of the Production and Efficiency of Variable and Loading Equipment in the Mining of Minerals. In E3S Web of Conferences (Vol. 491, p. 02022). EDP Sciences.
17. Eshonqulov, U. (2023). TEMIR TARKIBLI XOM ASHYODAN VA MA'DANLARDAN TEMIRNI AJRATIB OLISHNING TEXNOLOGIK O'LCHAMLARINI TADQIQ QILISH VA ANIQLASH. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 1(02).
18. Эшонкулов, У. Х., Зуевич, С. А., & Бильдзюк, Е. В. (2024). ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ В СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. Sanoatda raqamli texnologiyalar/Цифровые технологии в промышленности, 2(4), 87-94.
19. Хасанов, А. С., & Эшонкулов, У. Х. (2023). ПОДГОТОВКА К ОБОГАЩЕНИЮ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА. Western European Journal of Modern Experiments and Scientific Methods, 1(4), 143-151.
20. Kh, E. U. (2023). TECHNOLOGY FOR OBTAINING REDUCED IRON FROM PYRITE CINDERS. Western European Journal of Modern Experiments and Scientific Methods, 1(4), 120-125.