

Статья поступила в редакцию: 14.09.2026

Статья принята к публикации: 19.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 622.7+622.341

Исследование флотационного обогащения серебросодержащих руд с целью повышения извлечения серебра

Насирова Нигора Рамазановна

PhD, ст. преп

кафедры Металлургия, Навоийский государственный горно-технологический университет

Республика Узбекистан, г. Навои

E-mail: nigora.nasirova0502@gmail.com

Investigation of the flotation beneficiation of silver-bearing ores to increase silver recovery

Nasirova Nigora

PhD

in Technical Sciences Senior Lecturer, Department of Metallurgy, Navoi State University of Mining and Technologies

Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В работе представлены результаты лабораторных исследований по разработке и обоснованию технологической схемы переработки смешанной серебросодержащей руды. Исследован химический состав исходной руды и проведена серия флотационных опытов для определения рациональной степени измельчения и оптимизации реагентного режима. Установлено, что исходная руда содержит 2,2 г/т серебра, 1,0 % общей серы и 0,87 % сульфидной серы. Флотационные исследования выполнены при степени измельчения от 50 до 80 % класса –0,074 мм с использованием соды, аполярного собирателя И-20, ксантогената и медного купороса. Установлено, что повышение степени измельчения до 80 % класса – 0,074 мм способствует увеличению извлечения серебра в концентрат. Дополнительное введение соды и И-20 при измельчении улучшает показатели флотации, а эффективность медного купороса зависит от точки его подачи. В замкнутых опытах исследованы схемы прямого измельчения и мельнично-циклонизирующей флотации. Полученные результаты позволили обосновать рациональные условия флотационного обогащения и выбрать технологическую схему переработки исследуемой серебросодержащей руды.

Библиографическое описание: Насирова Н.Р. Исследование флотационного обогащения серебросодержащих руд с целью повышения извлечения серебра // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23425>

Abstract

The paper presents the results of laboratory studies on the development and substantiation of a technological flowsheet for processing mixed silver-bearing ore. The chemical composition of the initial ore was studied, and a series of flotation experiments was carried out to determine the rational degree of grinding and optimize the reagent regime. It was established that the initial ore contains 2.2 g/t of silver, 1.0 % total sulfur, and 0.87 % sulfide sulfur. Flotation studies were conducted at a grinding degree ranging from 50 to 80 % passing 0.074 mm, using soda ash, the non-polar collector I-20, xanthate, and copper sulfate. It was established that increasing the grinding degree to 80 % passing 0.074 mm contributes to an increase in silver recovery into the concentrate. Additional addition of soda ash and I-20 during grinding improves flotation performance, while the effectiveness of copper sulfate depends on its point of addition. Closed-circuit tests were conducted using direct grinding and mill–cyclone flotation flowsheets. The obtained results made it possible to substantiate the rational conditions for flotation concentration and select a technological flowsheet for processing the investigated silver-bearing ore.

Ключевые слова: серебросодержащая руда, флотация, серебро, измельчение, реагентный режим, медный купорос, аполярный собиратель И-20, сода, технологическая схема.

Keywords: silver-bearing ore, flotation, silver, grinding, reagent regime, copper sulfate, non-polar collector I-20, soda ash, technological flowsheet.

Введение

Серебросодержащие руды характеризуются сложным вещественным составом и различными формами нахождения ценных компонентов, что обуславливает необходимость совершенствования и оптимизации процессов их обогащения. Флотация является одним из наиболее распространённых методов переработки такого сырья, позволяющим концентрировать ценные минералы и повышать эффективность последующей металлургической переработки. При этом основные технологические показатели флотации существенно зависят от степени измельчения руды, состава и расхода реагентов, а также порядка и места их подачи.

Особое значение при переработке смешанных серебросодержащих руд имеет выбор рациональной степени измельчения, обеспечивающей необходимое раскрытие серебросодержащих минералов, и установление эффективного реагентного режима. Оптимизация данных параметров позволяет повысить извлечение серебра в концентрат и одновременно снизить его потери с хвостами флотации.

Материалы и методы исследования

Целью настоящей работы является определение рациональной степени измельчения и реагентного режима, а также обоснование технологической схемы флотационного обогащения смешанной серебросодержащей руды. Для достижения поставленной цели изучен химический состав исходной руды и проведена серия лабораторных флотационных опытов при различной степени измельчения. Дополнительно исследовано влияние соды,

аполярного собирателя И-20, ксантогената и медного купороса на показатели процесса и определены рациональные условия их применения. Результаты сокращённого и полного химических анализов исходной руды представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.**Результаты сокращенного химического анализа исходной руды**

Содержание, %							
Ag, г/т	S _{общ.}	S _s	Fe _{общ.}	C _{орг.}	C _{общ.}	As	Sb
2,2	1,0	0,87	3,41	0,17	0,27	0,15	0,002

По результатам химического анализа содержания ценного компонента в исходной руде составляет 2,2 г/т. А также содержание S_{общ.} 1 %, S_s 0,87 %.

Таблица 2.**Результаты полного химического (силикатного) анализа исходной руды**

Содержание компонентов, %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO
70,5	10,7	0,6	0,9	1,9	1,8	2,2	0,3	0,08

Флотационное обогащение

При проведении тестовых опытов по флотационному обогащению исходной руды первоначально были поставлены опыты по уточнению конечной степени измельчения, опыты ставились при помолах 50 %, 60 %, 70 % и 80 % класса -0,074 мм, в открытом цикле на исходном реагентном режиме:

1-я основная флотация – 10 мин.; Kst -140г/т; Т-92 – 80г/т;

2-я основная флотация – 20 мин.; Kst -70г/т; Т-92-30г/т;

контрольная флотация – 15мин.; Kst -30г/т; Т-92-10г/т.

В последующих опытах проверялась целесообразность использования соды, аполярного собирателя И-20 и медного купороса, отрабатывались точки подачи и расходов реагентов. Опыты по уточнению реагентного режима проводились на помол до 80 % класса – 0,074мм.

Результаты тестовых опытов по флотационному обогащению и корректировки реагентного режима представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3.**Результаты флотационных опытов при различной тонине помола исходной руды**

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Ag, г/т	Ss	Cорг	Ag	Ss	Cорг
Опыт 1. 50% класса -0,074мм							
Концентрат 1	3,56	22,50	8,80	2,10	35,64	27,70	20,28
Концентрат 2	4,36	7,70	6,00	0,96	14,91	23,09	11,33
Концентрат 3	2,77	4,70	5,60	0,73	5,79	13,71	5,48
кон-т об.	10,69	11,86	6,83	1,28	56,34	64,50	37,09

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Ag, г/т	Ss	Сорг	Ag	Ss	Сорг
Хвосты	89,31	1,10	0,45	0,26	43,66	35,50	62,91
Руда	100,00	2,25	1,13	0,37	100,00	100,00	100,00
Опыт 2. 60% класса -0,074мм							
Концентрат 1	3,80	21,50	8,60	1,79	36,69	29,74	18,84
Концентрат 2	5,60	7,30	6,50	0,83	18,36	33,12	12,88
Концентрат 3	2,80	4,40	3,60	0,65	5,53	9,17	5,04
кон-т об.	12,20	11,06	6,49	1,09	60,57	72,04	36,76
Хвосты	87,80	1,00	0,35	0,26	39,43	27,96	63,24
Руда	100,00	2,23	1,10	0,36	100,00	100,00	100,00
Опыт 3. 70% класса -0,074мм							
Концентрат 1	4,50	19,80	8,00	1,62	40,27	33,93	20,63
Концентрат 2	6,60	6,40	5,20	0,82	19,09	32,34	15,32
Концентрат 3	3,80	3,50	2,70	0,58	6,01	9,67	6,24
кон-т об.	14,90	9,71	5,41	1,00	65,38	75,94	42,19
Хвосты	85,10	0,90	0,30	0,24	34,62	24,06	57,81
Руда	100,00	2,21	1,06	0,35	100,00	100,00	100,00
Опыт 4. 80% класса -0,074мм							
Концентрат 1	6,00	15,10	6,63	1,73	41,81	36,47	26,85
Концентрат 2	7,30	5,30	3,74	0,73	17,85	25,03	13,79
Концентрат 3	4,70	2,90	3,70	0,52	6,29	15,94	6,32
кон-т об.	18,00	7,94	4,69	1,01	65,95	77,45	46,96
Хвосты	82,00	0,90	0,30	0,25	34,05	22,55	53,04
Руда	100,00	2,17	1,09	0,39	100,00	100,00	100,00
Опыт 5. 70% класса -0,074мм, в изм,- сода-1000г/т, И-20-60г/т,							
Концентрат 1	5,90	13,80	6,78	1,90	37,79	37,97	29,51
Концентрат 2	8,70	6,60	3,66	0,70	26,65	30,22	16,03
Концентрат 3	3,60	3,10	3,40	0,52	5,18	11,62	4,93
кон-т об.	18,20	8,24	4,62	1,05	69,62	79,81	50,47
Хвосты	81,80	0,80	0,26	0,23	30,38	20,19	49,53
Руда	100,00	2,15	1,05	0,38	100,00	100,00	100,00
Опыт 6. 80% класса -0,074мм, в изм,- сода-1000г/т, И-20-60г/т,							
Концентрат 1	6,04	12,60	6,20	1,73	34,77	36,33	28,14
Концентрат 2	9,67	6,90	3,70	0,64	30,47	34,69	16,65
Концентрат 3	4,33	2,80	2,10	0,49	5,54	8,82	5,71
кон-т об.	20,04	7,73	4,11	0,94	70,78	79,84	50,50
Хвосты	79,96	0,80	0,26	0,23	29,22	20,16	49,50
Руда	100,00	2,19	1,03	0,37	100,00	100,00	100,00
Опыт 7. 80% класса -0,074мм, в изм,- сода-1000г/т, И-20-60г/т, Kst-80г/т, в 1-осн, Kst-60г/т							
Концентрат 1	7,20	16,70	9,90	1,70	55,83	64,35	30,10
Концентрат 2	8,10	3,70	2,40	0,74	13,91	17,55	14,74
Концентрат 3	4,20	2,10	0,94	0,55	4,10	3,56	5,68
кон-т об.	19,50	8,16	4,85	1,05	73,84	85,47	50,52

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Ag, г/т	Ss	Cорг	Ag	Ss	Cорг
Хвосты	80,50	0,70	0,20	0,25	26,16	14,53	49,48
Руда	100,00	2,15	1,11	0,41	100,00	100,00	100,00

При увеличении выхода готового класса при измельчении с 50 % до 80 %, извлечение серебро в концентрат увеличивается на 12,6 % (таблица 3, опыты 1 – 4).

Дозирование в измельчение соды 1000г/т и аполярного собирателя И-20 - 60г/т увеличивает извлечение металла во флотоконцентрат на 1 %, содержание серебра в хвостах флотации 0,80г/т в обоих случаях (таблица 3, опыты 5 и 6).

При частичном переводе подачи ксантогената в мельницу (80г/т в изм-е и 60г/т в 1-ю основ.), извлечение повышается на 3%, содержание серебра в хвостах флотации снижается с 0,80г/т до 0,70г/т (таблица 3, опыты 6 и 7).

Заключительные опыты по флотации на пробе проводились в замкнутом цикле, имитирующем непрерывный процесс. Каждый опыт ставился на пяти и трех-килограммовых навесках. Опыты ставились по схеме прямого обогащения руды при помоле 80 % класса – 0,074мм и м/ц флотацией, при содержании готового класса в питании м/ц флотации 55 %, в питании основной 80 % класса -0,074мм.

Реагентный режим для опытов включал дозировку следующих реагентов:

- в измельчение сода – 1000г/т, И-20 – 60г/т. CuSO_4 -100г/т;
- м/ц флотация – 7 мин, Kst -140г/т, Т – 92 -80г/т;
- основная флотация – 20 мин, Kst -90г/т, Т- 92 – 30г/т;
- контрольная флотация – 18мин, Kst -40г/т, Т- 92 -10г/т.

Данные полученные по последним навескам представлены в таблицах 4 и 5.

Как видно из представленных результатов, извлечение серебро во флотоконцентрат при прямом обогащении руды получено 64,41%, при содержании в хвостах флотации 0,80 г/т. При стадийном обогащении с м/ц флотацией извлечение составило 67,66%, при содержании серебро в хвостах флотации 0,80 г/т.

Таблица 4.

Результаты замкнутых опытов по флотации с прямым измельчением руды

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Ag,г/т	S _s	C _{орг}	Ag	S _s	C _{орг}
Конц-т 1осн - 5	5,92	14,9	8,50	1,90	43,08	49,34	29,90
Конц-т переч - 5	3,01	14,5	10,50	1,80	21,33	31,01	14,41
Об-ный кон-т	8,93	14,8	9,17	1,87	64,41	80,35	44,31
Хвосты	91,07	0,8	0,22	0,23	35,59	19,65	55,69
Руда	100,00	2,0	1,02	0,38	100,00	100,00	100,00

Таблица 5.

Результаты замкнутых опытов с м/ц флотацией

Наименование продуктов	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Ag, г/т	S _s	C _{орг}	Ag	S _s	C _{орг}
Конц-т м/ц 5	6,53	17,1	9,30	1,56	49,76	57,88	26,36
Конц-т пер 5	2,77	14,5	9,4	1,43	17,90	24,82	10,25
Об-ный кон-т	9,30	16,3	9,33	1,52	67,66	82,70	36,61
Хвосты	90,70	0,8	0,20	0,27	32,34	17,30	63,39
Руда	100,00	2,2	1,05	0,39	100,00	100,00	100,00

Заключение

По результатам лабораторных исследований установлено, что рациональная степень измельчения исследуемой руды составляет 80 % класса -0,074 мм. Дополнительная подача соды и аполярного собирателя И-20 в измельчение, а также перераспределение части ксантогената способствуют повышению извлечения серебра.

В замкнутых опытах извлечение серебра при прямом обогащении составило 64,06–64,41 %, тогда как при стадийной схеме с мельнично-циклонизирующей флотацией достигло 66,36–67,66 %. Таким образом, стадийная схема обеспечивает более высокое извлечение серебра и может быть рекомендована для дальнейшей переработки исследуемой руды.

Список литературы

1. Доняров Н.А. Нодир металлар металлургияси / Н.А. Доняров [и др.]. – Ташкент. – 2021.
2. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: в 2 т. / В.В. Лодейщиков. – Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. – 786 с.
3. Самадов А.У., Буруно А.Б., Хужакулов Н.Б. Биогидрометаллургический способ переработки сульфидных руд Узбекистана // Научное обозрение технических наук. – 2019. – С. 100–106.
4. Самадов А.У. Изучение возможности усовершенствования технологии переработки руд месторождения «Аджибугут» / А.У. Самадов [и др.] // Academy. – 2021. – № 5 (68). – С. 11–14.
5. Самадов А.У. [и др.] // Горный вестник Узбекистана. – 2019. – № 3 (78). – С. 9–12.
6. Санакулов К.С., Саломов Ф.И., Хасанов А.С. Всё о золоте. – Ташкент: Turon Zamin Ziyoy, 2017. – 456 с.
7. Санакулов К.С. Теория и практика освоения переработки золотосодержащих упорных руд Кызылкумов / К.С. Санакулов, У.А. Эргашев. – Ташкент: ГП «НИИМР», 2014. – 297 с.
8. Семенович А.В., Лоскутов С.Р. Кинетика сорбции катионных красителей модифицированной корой хвойных древесных пород Сибири // Химия растительного сырья. – 2015. – № 4. – С. 101–109.
9. Chugaeva L.V. Metallurgy of noble metals / L.V. Chugaeva [et al.]. – 2nd ed., rev. and suppl. – Moscow: Metallurgy, 1987. – 432 P.

10. Sanakulov K. A new approach to the classification of refractory gold ores: a case study of Kyzylkum deposits / K. Sanakulov, U.A. Ergashev, I.O. Khamroev, O.U. Fuzaylov // Non-ferrous Metals. – 2023. – № 9. – P. 22–30.

References

1. Donyarov N.A., Khuzhakulov N.B., Vokhidov B.R., Azimov O.A., Aripov A.R. [Rare Metals Metallurgy]. – Tashkent. – 2021. (In Russ.)
2. Lodejshchikov V.V. [Technology of Gold and Silver Extraction from Refractory Ores: in 2 volumes]. – Irkutsk: OAO «Irgiredmet», 1999 (In Russ.)
3. Samadov A.U., Burono A.B., Khuzhakulov N.B. [Biohydrometallurgical Method of Processing Sulfide Ores of Uzbekistan] // Nauchnoe obozrenie tekhnicheskikh nauk. – 2019. (In Russ.)
4. Samadov A.U., Ergashev U.A., Khuzhamov U.U., Makhmudova F.M. [Study of the Possibility of Improving the Technology of Processing Ores from the Adjibugut Deposit] // Academy. – 2021. (In Russ.)
5. Samadov A.U., Khuzhakulov N.B., Burono A.B. i dr. [Mining Bulletin of Uzbekistan]. – Navoi, 2019. – T. 11, № 3 (In Russ.)
6. Sanakulov K.S., Salomov F.I., Khasanov A.S. [All About Gold]. – Tashkent: Turon Zamin Ziyo, 2017. – 456 s (In Russ.)
7. Sanakulov K.S., Ergashev U.A. [Theory and Practice of Development of Processing Gold-Bearing Refractory Ores of Kyzylkum]. – Tashkent. – 2014. (In Russ.)
8. Semenov A.V., Loskutov S.R. [Kinetics of Sorption of Cationic Dyes on Modified Bark of Coniferous Wood Species of Siberia] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2015. – No. 4. (In Russ.)
9. Chugaeva L.V. Metallurgy of noble metals. – Moscow: Metallurgy, 1987.
10. Sanakulov K., Ergashev U.A., Khamroev I.O., Fuzaylov O.U. A new approach to the classification of refractory gold ores: a case study of Kyzylkum deposits // Non-ferrous Metals. – 2023. – No. 9.