МРНТИ 52.45.19 **https://doi.org/10.58805/kazutb.v.2.31-1375**

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДИТИОФОСФАТНЫХ СОБИРАТЕЛЕЙ ПРИ ФЛОТАЦИИ ОКИСЛЕННОЙ СВИНЦОВО-ЦИНКОВОЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОСКУДУК

[1]А.Р. Мамбеталиева, [1]Г.К. Макашева, [1]Л.Б. Сабирова, [2]Т.Ш. Тусупбекова, [1]А.Ж. Танабаева

[1]Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.Сатпаева, Алматы, Казахстан,
[2]ТОО «КазГидроМедь», Караганда, Казахстан

Корреспондент-автор: mguldanka@,mail.ru

В работе рассмотрены результаты исследования эффективности применения многокомпонентных дитиофосфатных собирателей при флотации окисленной свинцово-цинковой руды месторождения Коскудук. Показано, что исследуемая руда характеризуется высокой степенью окисления и преобладанием кислородсодержащих форм свинца, что существенно снижает эффективность ксантогенатных режимов флотации. Минералогические и фазовые исследования руды выполнены с применением оптической микроскопии и методов химического анализа.

Флотационные опыты проведены в лабораторных условиях с использованием стадии сульфидизации сернистым натрием и различных дитиофосфатных собирателей. Установлено, что применение стандартного ксантогенатного собирателя обеспечивает извлечение свинца на уровне 46,9 %. Использование многокомпонентного диалкилдитиофосфатного собирателя позволило повысить извлечение свинца до 58,51 %, что соответствует увеличению на 11,61 % по сравнению с базовым режимом, при росте выхода свинцового концентрата до 10,76 %.

Анализ эффективности разделения с использованием критерия Ханкока-Люйкена показал, что повышение технологической эффективности процесса достигается преимущественно за счет увеличения выход концентрата, при некотором снижении его селективности. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения многокомпонентных дитиофосфатных собирателей при переработке окисленных и смешанных свинцово-цинковых руд и могут быть использованы для оптимизации реагентных режимов флотации на обогатительных фабриках.

Ключевые слова: окисленные свинцово-цинковые руды, флотация, дитиофосфатные собиратели, извлечение свинца, сульфидизация, критерий Ханкока–Люйкена, месторождение Коскудук.

ҚОСҚҰДЫҚ КЕН ОРНЫНЫҢ ТОТЫҚҚАН ҚОРҒАСЫН-МЫРЫШ КЕННІҢ ФЛОТАЦИЯЛАУ КЕЗІНДЕ КӨП КОМПОНЕНТТІ ДИТИОФОСФАТТЫ ЖИНАҒЫШТАРДЫ ҚОЛДАНУДЫҢ ТИІМДІЛІГІ

[1]А.Р. Мамбеталиева, [2]Г.К. Макашева, [1]Л.Б. Сабирова, [2]Т.Ш. Тусупбекова, [1]А.Ж. Танабаева

[1]Қ.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан,
[2]«КазГидроМедь» ЖШС, Қарағанда, Қазахстан,
e-mail: mguldanka@mail.ru

Бұл жұмыста Коскудук кен орнының тотыққан қорғасын-мырыш кеннің флотациялау кезінде көп компонентті дитиофосфатты жинағыштарды қолданудың тиімділігі зерттелді. Зерттелген кеннің жоғары дәрежеде тотыққандығымен және қорғасынның оттекқұрамды минералдарының басым болуымен сипатталатыны көрсетілді, бұл дәстүрлі ксантогенаттық флотация режимдерінің тиімділігін айтарлықтай төмендетеді. Кеннің минералогиялық және фазалық құрамы оптикалық микроскопия және химиялық талдау әдістері арқылы анықталды.

Флотациялық тәжірибелер зертханалық жағдайда натрий сульфидімен алдын ала сульфидтеу сатысын қолдана отырып және әртүрлі дитиофосфатты жинағыштармен жүргізілді. Дәстүрлі ксантогенаттық жинағышты қолдану кезінде қорғасынның алынуы 46,9 % деңгейінде болғаны анықталды. Ал көпкомпонентті диалкилдитиофосфатты жинағышты қолдану қорғасынның алынуын

58,51 %-ға дейін арттырып, базалық режиммен салыстырғанда 11,61 %-ға жоғары нәтиже көрсетті, сонымен қатар концентраттың шығымы 10,76 %-ға дейін өсті.

Хэнкок–Люйкен критерийін пайдалана отырып жүргізілген бөліну тиімділігін бағалау технологиялық көрсеткіштердің жақсаруы негізінен концентрат шығымының артуы есебінен жүзеге асқанын, бұл ретте селективтіліктің біршама төмендегенін көрсетті. Алынған нәтижелер тотыққан және аралас қорғасын-мырыш кендерін флотациялау кезінде көпкомпонентті дитиофосфатты жинағыштарды қолданудың орындылығын дәлелдейді және байыту фабрикаларында реагенттік режимдерді оңтайландыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: тотыққан қорғасын-мырыш кендері, флотация, дитиофосфатты жинағыштар, қорғасынның алынуы, сульфидтеу, Хэнкок–Люйкен критерийі, Коскудук кен орны.

EFFICIENCY OF MULTICOMPONENT DITHIOPHOSPHATE COLLECTORS IN THE FLOTATION OF OXIDIZED LEAD–ZINC ORE FROM THE KOKSUDUK DEPOSIT

[1]A.R. Mambetaliyeva, [2]G.K. Makasheva✉, [1]L.B. Sabirova, [2]T.Sh. Tussupbekova, [1]A.Zh. Tanabayeva

[1]K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan,
[2]KazHydroMed LLP, Karaganda, Kazakhstan,
e-mail: mguldanka@mail.ru

This paper presents the results of a study on the efficiency of multicomponent dithiophosphate collectors in the flotation of oxidized lead–zinc ore from the Koksuduk deposit. It is shown that the studied ore is characterized by a high degree of oxidation and a predominance of oxygen-containing lead minerals, which significantly reduces the efficiency of conventional xanthate flotation regimes. Mineralogical and phase analyses of the ore were carried out using optical microscopy and chemical analysis methods.

Flotation tests were performed under laboratory conditions with preliminary sulfidization using sodium sulfide and various dithiophosphate collectors. It was established that the use of a conventional xanthate collector provided a lead recovery of 46.9%. The application of a multicomponent dialkyldithiophosphate collector increased lead recovery to 58.51%, corresponding to an improvement of 11.61% compared to the baseline regime, while the concentrate yield increased to 10.76%.

An evaluation of separation efficiency using the Hancock–Luyken criterion showed that the improvement in technological performance was achieved mainly due to an increase in concentrate yield, accompanied by a slight decrease in selectivity. The obtained results confirm the feasibility of using multicomponent dithiophosphate collectors for the flotation of oxidized and mixed lead–zinc ores and can be applied to optimize reagent regimes at mineral processing plants.

Keywords: oxidized lead–zinc ores, flotation, dithiophosphate collectors, lead recovery, sulfidization, Hancock–Luyken criterion, Koksuduk deposit.

Введение. Окисленные свинцово-цинковые руды занимают существенную позицию в минерально-сырьевой базе Республики Казахстан, так как значительная доля разведанных запасов полиметаллического сырья относится к зоне гипергенеза. По данным анализа отечественных авторов свидетельствует о том, что к характерным объектам такого типа относятся месторождения Риддер-Сокольное, Зыряновское, Малевское, Шалкия, Ачисай и Коскудук, для которых характерно широкое распространение окисленных и смешанных руд [1-3].

По анализам минералогический состав окисленных свинцовых руд представлен в основном церусситом ($PbCO_3$), англезитом ($PbSO_4$), а также сложными силикатными и карбонатными соединениями свинца. Данные минералы различаются выделяющейся гидрофильностью, отрицательным зарядом поверхности и слабой способностью к поглощению стандартных сульфгидрильных собирателей, что значительно усложняет их флотационное извлечение [4,5]. По дан-

ным авторов исследования, при переработке окисленных свинцовых руд использование стандартных ксантогенатных режимов приводит к низким результатам извлечения свинца и нестабильной работе флотационных схем [1,2].

Определено, что поверхностные свойства окисленных минералов свинца различаются от свойств сульфидных фаз. Церуссит и англезит вовсе не способны образовывать устойчивых гидрофобных пленок при связи с ксантогенатами, даже при увеличении дозировки реагентов. Это связано с перевесом кислородсодержащих функциональных групп на поверхности минералов и низкой химической связью между молекулами собирателя и катионами Pb^{2+} [6].

Одним из часто встречающихся методов увеличения флотационной активности окисленных минералов является сульфидизация, осуществляемая обработкой пульпы растворами сернистого натрия и аммония. Предполагается, что в конечном итоге этого процесса на поверхности церуссита образуется тонкий слой PbS, позволяющий адсорбции сульфгидрильных реагентов. Но тем не менее современные исследования указывают на частые дискретные, нестабильные и склонные ко вторичному окислению сульфидные пленки, особенно в среде минерализованных оборотных вод, которые снижают эффективность этого подхода [7- 9].

Следовательно, в современной практике переработки окисленных свинцово-цинковых руд возрастает интерес к использованию реагентов нового поколения, способных эффективно вступать в реакцию с поверхностью минералов без необходимого формирования сплошного сульфидного слоя. К числу наиболее эффективных относятся фосфорорганические собиратели – дитиофосфаты, диалкилдитиофосфаты и их модифицированные формы, обладающие выраженной комплексообразующей способностью по отношению к ионами Pb^{2+} и дающие формирование плотных и устойчивых адсорбционных пленок на поверхности кислородсодержащих минералов свинца [10 - 13].

Комплекс литературных данных показывают о том, что использование многокомпонентных дитиофосфатных реагентов позволяет увеличить извлечение свинца, а также выровнить технологические показатели флотации при переработке окисленных и смешанных руд. Это позволяет рассуждать о перспективном направлением усовершенствования реагентных режимов данного класса собирателей.

Целью данного исследования является анализ эффективности использования многокомпонентных дитиофосфатных собирателей при флотации окисленной свинцово-цинковой руды месторождения Коскудук и аргументация возможности увеличения извлечения свинца.

Материалы и методы. Обьектом исследования является окисленная свинцово-цинковая руда месторождения Коскудук.

Исследование минерального состава проводилось в отраженном свете в полированных аншлифах с применением микроскопа OLYMPUS BX 53, видеокамеры SIMAGIS XS-3CU и программного обеспечения для анализа изображений Минерал С7 компании SIAMS.

Минералогический показатель руды и продуктов ее обогащения ограничены из-за тонких частиц рудных минералов и присутствия тонких взвесей глинистого материала, а также широкого развития процесса замещения сульфидных минералов окислами (пирита гетитом и гематитом). Остатки сульфидных минералов при этом, являясь допустимыми по размерам для раскрытия и извлечения, уменьшаются по крупности до 5 мкм и менее, что отмечается на аншлифах, представленных на рисунке 1.

В связи со сложным минералогическим составом рассматриваемых окисленных руд были выполнены анализы вещественного состава пробы с применением различных методов аналитической химии: атомно-адсорбционного и атомно эмиссионного анализа, классического химического и фотометрического анализа.

Из рисунка 2 следует, что проба рассматриваемой руды содержит свинец 0,58 % и цинк 0,56 %, содержание меди не высокое (0,02 %) и не представляет промышленного интереса.

При изучении вещественного состава иссле-

дуемого материала особое внимание было уделено формам нахождения цинка, свинца и железа, что позволило оценить их перерабатываемость и возможные методы обогащения.

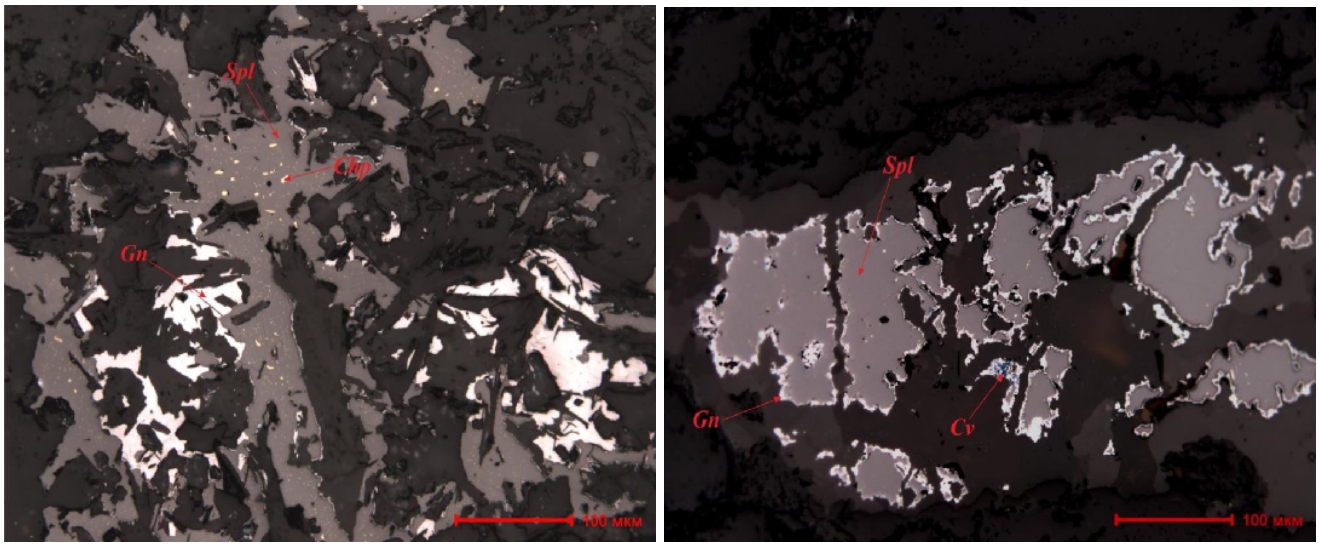


Рис.1 - Аншлиф. Вкрапленная структура халькопирита (Chp) в сфалерите (Spl), галенит (Gn). Ув.200х

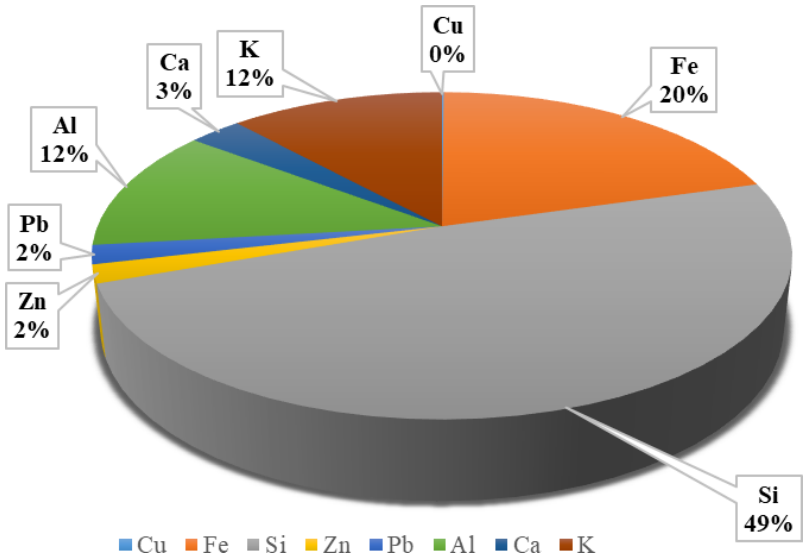


Рис.2 - Химический состав полиметаллической руды

Из результатов фазового химического анализа (таблица 1) следует, что рассматриваемая проба относится к окисленному типу, так как свинец представлен окисленными и силикатными соединениями на 77,59 % относительных, а цинк – на 87,5 % отн. Можно отметить, что и железо пребывает почти полностью в окисленной форме, т.к. сульфидных форм железа очень мало – менее 0,05 % абс.

Согласно данным химического, минералогического и фазового анализов можно сделать вывод, что по степени окисления, структурно-текстурным характеристикам, а также по размеру вкрапленности исследуемые окисленные руды месторождения Коскудук относятся к категории тонко вкрапленных и труднообогатимых.

Таблица 1 - Результаты химического фазового анализа окисленной руды месторождения Коскудук

Наименование компонентов	Содержание	
	Абсолютное, %	Относительное, %
Формы нахождения цинка:		
- Водорастворимый	*<0,05*	*-*
- Окисленный	*0,31*	*55,36*
- Сульфиды	*0,07*	*12,50*
- Труднорастворимый	*0,18*	*32,14*
Суммарно	**0,56**	**100,0**
Формы нахождения свинца:		
- Кислородсодержащий	*0,29*	*50,00*
- Галенит	*0,13*	*22,41*
- Остаточные формы	*0,16*	*27,59*
Суммарно	**0,58**	**100,0**
Формы нахождения железа:		
- Сульфиды	*<0,05*	*-*
- Двухвалентное Fe^{2+}	*3,06*	*48,6*
- Трехвалентное Fe^{3+}	*3,24*	*51,4*
Суммарно	**6,30**	**100,0**

Обсуждение и результаты. Флотационные исследования окисленных руд были начаты установлением сульфидизации с использованием сернистого натрия. Из материалов статьи [14] следует, что с увеличением расхода сернистого натрия с 200 г/т до 700 г/т, увеличивается эффективность обогащения по свинцу на 10,8 % (с 34,3 до 45,1 %), тем самым извлечение по серебру и золоту составило – 60,2 и 59,6 %. Оптимальным расходом для сульфидизации окисленной руды Коскудук составило 500 г/т. В рамках произведенных флотационных исследований окисленной свинца и цинка содержащейся в руде месторождения Коскудук, была изучена эффективность применения альтернативного собирателя группу дитиофосфатных реагентов, показанных на таблице 2.

Таблица 2 - Характеристика дитиофосфатных реагентов применяемых при флотации окисленных руд

Тип/группа	Обощенная структура*	Основные свойства	Область применения
Натриево-бутиловый дитиофосфат	$Na^+[P(S)(S\text{-}Bu)2]^-$	Устойчивая адсорбция на Pb; высокая гидрофобизация	Pb – минералы после сульфидизации
Натриево-изобутиловый дитиофосфат	$Na^+[P(S)(S\text{-}iBu)2]^-$	Плотная органическая пленка; улучшенное прилипание пузырьков	Окисленные и смешанные руды

Аммоний-изобутиловый дитиофосфат	$NH4^{+}[P(S)(S\text{-}iBu)2]^{-}$	Высокая селективность; активен при низком pH	Окисленные руды
Модифицированные просмотор DTP - типа	R-O-P(S)-S-R’	Глубокая гидрофобизация; активен на несульфидированных участках	Окисленные руды
Композиционный промотор DTP - типа	R-O-P(S)-S-R’ (модиф.)	Высокая реакционная способность; плотная пленка	Смешанные руды
Высокоактивная смесь DTP - производных	R-O-P(S)-S-R’ (модиф.)	Устойчивая адсорбция; высокая плотность покрытия	Труднообогати-мые руды
Специализирован-ный реагент для оксидов	R-O-P(S)-S-R’ (модиф.)	Высокая активность в отношении оксидных пленок	Окисленные руды
Многокомпонент-ный диалкилдитио-фосфат	R-O-P(S)-S-R’ + органические модификаторы	Устойчивая пленка; активность на несульфидированных центрах; высокая селективность	Окисленные и смешанные руды

Технологическая схема проведения лабораторных тестовых опытов приведена на рисунке 3.

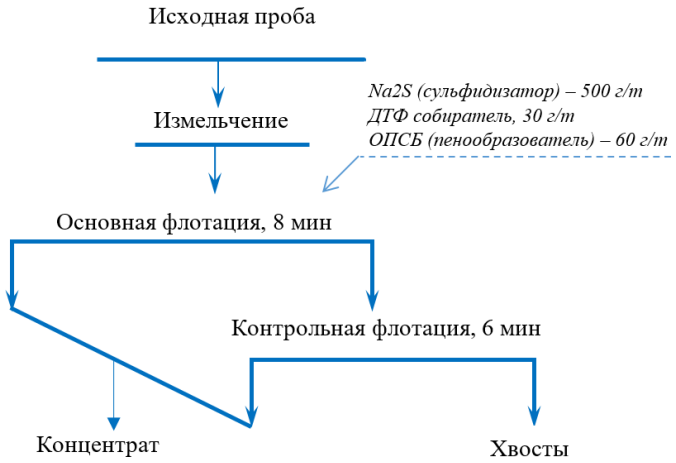


Рис.3 - Схема открытых опытов по тестовым испытаниям селективного собирателя

Таблица 3 - Результаты открытых опытов по флотации исходной пробы окисленной руды месторождения Коскудук с использованием селективного собирателя

Селективный собиратель	**Наименование продуктов**	**Выход, %**	**Содержание, %**			**Извлечение, %**		
			Pb	**Zn**	**Fe**	**Pb**	**Zn**	**Fe**
Базовый опыт (БО)								

Калий бутиловый ксантогенат - C4H9OCS2K	Концентрат	5,71	4,76	0,73	7,85	46,9	7,4	7,1
	Хвосты	94,29	0,33	0,55	6,22	53,1	92,6	92,9
	Исходная проба	100,0	0,58	0,56	6,31	100,0	100,0	100,0
Тест 1								
Специализированный реагент для оксидов	Концентрат	6,48	3,31	1,08	9,40	36,98	12,49	9,66
	Хвосты	93,52	0,39	0,52	6,10	63,02	87,51	90,34
	Исходная проба	100,0	0,58	0,56	6,31	100,0	100,0	100,0
Тест 2								
Высокоактивная смесь DTP - производных	Концентрат	5,50	3,13	1,01	7,95	29,67	9,9	6,9
	Хвосты	94,50	0,43	0,53	6,21	70,33	90,1	93,1
	Исходная проба	100,0	0,58	0,56	6,31	100,0	100,0	100,0
Тест 3								
Многокомпонентный диалкилдитиофосфат	Концентрат	10,76	3,15	1,31	9,73	58,51	25,11	16,58
	Хвосты	89,24	0,27	0,47	5,90	41,49	74,89	83,42
	Исходная проба	100,0	0,58	0,56	6,31	100,0	100,0	100,0
Тест 4								
Модифицированные промотор DTP - типа	Концентрат	6,69	2,99	1,03	8,36	34,48	12,4	8,9
	Хвосты	93,31	0,41	0,53	6,16	65,52	87,6	91,1
	Исходная проба	100,0	0,58	0,56	6,31	100,0	100,0	100,0
Тест 5								
Композиционный промотор DTP - типа	Концентрат	7,85	2,39	0,97	8,15	32,40	13,6	10,1
	Хвосты	92,15	0,43	0,53	6,15	67,60	86,4	89,9
	Исходная проба	100,0	0,58	0,56	6,31	100,0	100,0	100,0
Тест 6								
Аммоний-изобутиловый дитиофосфат	Концентрат	9,79	2,34	0,94	7,95	39,46	16,50	12,33
	Хвосты	90,21	0,39	0,52	6,13	60,54	83,50	87,67
	Исходная проба	100,0	0,58	0,56	6,31	100,0	100,0	100,0
Тест 7								
Натриево-бутиловый дитиофосфат	Концентрат	9,75	2,22	0,96	7,74	37,24	16,7	12,0
	Хвосты	90,25	0,40	0,52	6,16	62,76	83,3	88,0
	Исходная проба	100,0	0,58	0,56	6,31	100,0	100,0	100,0
Тест 8								
Натриево-изобутиловый дитиофосфат	Концентрат	9,60	1,88	0,75	6,62	31,17	12,92	3,33
	Хвосты	90,40	0,44	0,54	6,28	68,83	87,08	96,67
	Исходная проба	100,0	0,58	0,56	6,31	100,0	100,0	100,0

Из данных таблицы 3 следует, что использование селективного собирателя многокомпонентный диалкилдитифосфат извлечение свинца повышается на 11,61 % (с 46,9 до 58,51 %).

Кроме обычных технологических показателей, относящих к продуктам обогащения - выход, содержание ценного компонента, извлечения, часто используются технологические критерии эффективности разделения. Для определения критерии эффективности разделения свинца использована формула Ханкока-Люйкена.

Значение критерия Ханкока-Люйкена рассчитывается по следующей формуле:

$$E = \frac{\varepsilon - \gamma}{1 - \alpha} \quad (1)$$

где, ε - извлечение свинца в суммарной концентрат, %;

γ - выход свинцового концентрата, %;

α - содержание свинца в исходной пробе, %.

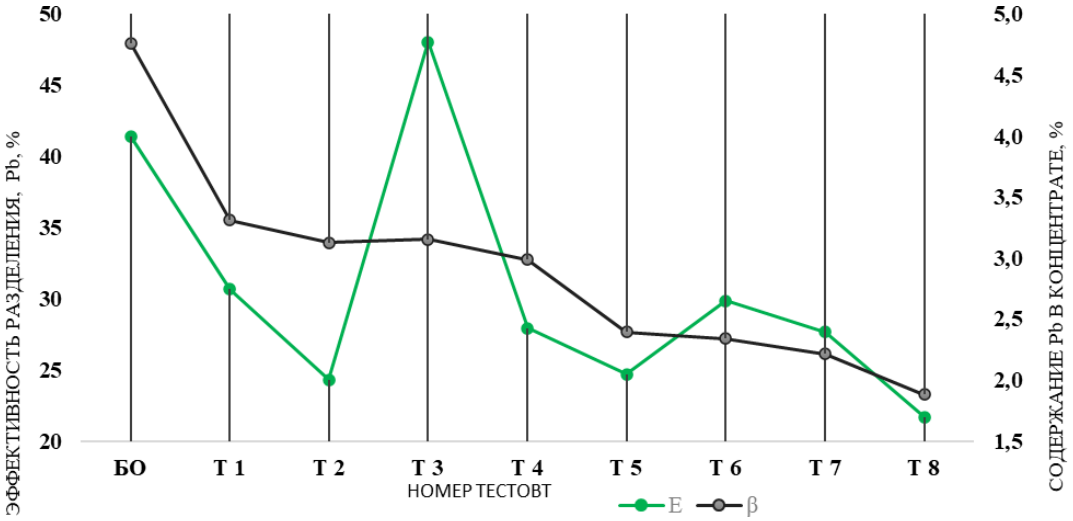


Рис.4 - Эффективность разделения свинца в зависимости от применение селективного собирателя

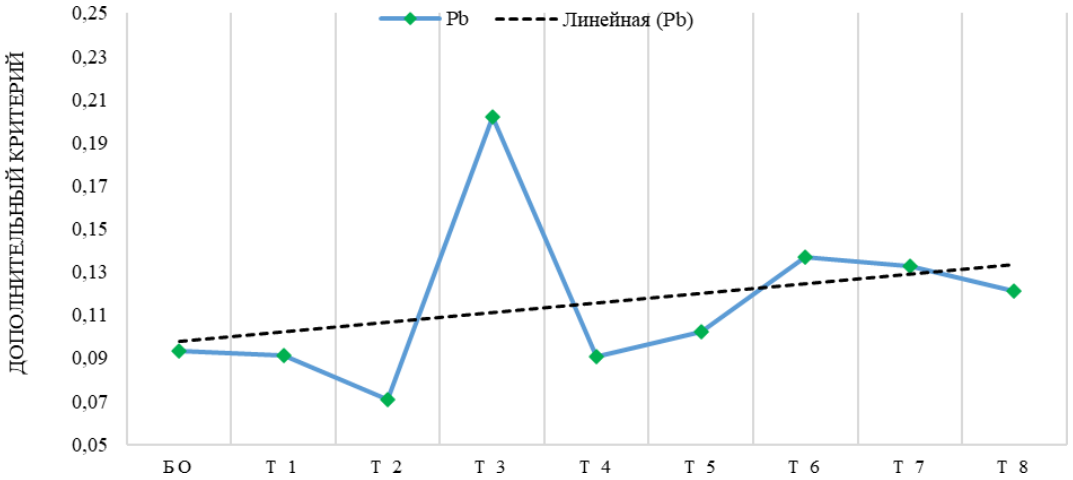


Рис.5 - Дополнительный критерий эффективности разделения свинца

Результаты расчетов, представленные на рисунке 4, показывает, что характер изменения критерия эффективности определяется повышением выхода концентрата при использовании

многокомпонентного диалкилдитифосфата, при этом содержание свинца в свинцовом концентрате снижается.

Возможны и все промежуточные случаи: с ростом частного выхода «концентрат» операции идеального разассигнования от первого варианта ко второму при одной и той же эффективности разделения в целом уменьшается роль недоизвлечения обогащаемого компонента в концентрат и возрастает роль загрязнения концентрата. Операционный выход «концентрата» в процессе совершенного разассигнования может выполнять критерием, дополнительным к критерию Ханкока-Люйкена:

По данным из рисунка 5 показывает, что дополнительный критерий для свинца в каждых исследованных режимах принимает меньшие единицы, что показывает на доминирующее влияние недоизвлечения обогащаемого компонента в концентрат на уменьшение общей эффективности разделения. Предельное значение критерия выявляется при использовании многокомпонентного диалкилдитифосфата, что свидетельствует об увеличении роли загрязнения концентрата при достижении максимальной эффективности процесса.

Выводы. Проведенные исследования показали, что окисленная свинцово-цинковая руда месторождения Коскудук характеризуется высокой степенью окисления, тонкой вкрапленностью рудных минералов и преобладанием кислородсодержащих форм свинца, доля которых составляет 77,59 % от общего содержания свинца. Показанные минералого-химические особенности определяют низкую эффективность классических собирателей на флотации и обуславливают необходимость применения альтернативных собирателей, ориентированных на взаимодействие с кислородсодержащими поверхностными центрами минералов.

Результаты флотационных исследование подтвердили, что применение базового собирателя (бутиловый ксантогената) обеспечивает извлечение свинца на уровне 46,9 % при выходе 5,71 %. Применение многокомпонентного диалкилдитиофосфатного собирателя дало повышение выхода свинцового концентрата до 10,76 % и увеличить извлечение свинца до 58,51 %, что приравнивается к приросту извлечения на 11,61 % по сравнению с базовым режимом. Полученные данные показывают о более эффективном взаимодействии данного класса реагентов с поверхностью окисленных минералов свинца по сравнению с ксантогенатами.

Анализ показателей эффективности разделения с использованием критерия Ханкока-Люйкена выявил, что увеличение общей эффективности процесса при использовании многокомпонентного диалкилдитиофосфата осуществляется в основном за счет повышения выхода концентрата. При этом уменьшение содержания свинца в концентрате указывает на увеличения роли загрязнения продукта, что демонстрирует присущий для флотационных процессов оптимальных между полнотой извлечения и селективностью разделения.

Полученные результаты имеют практическую значимость для переработки окисленных и смешанных свинцово-цинковых руд месторождения Коскудук и аналогичных обьектов Восточного Казахстана. Увеличение извлечения свинца на 10-12 % по сравнению с ксантогенатным режимам дает возможность рассматривать многокомпонентные дитиофосфатные собиратели как оптимизации реагентных режимов флотации и вовлечения в переработку труднообогатимых руд и техногенных минеральных образований.

***Финансирование**: Исследование проведено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках грантового проекта № AP23489765.*

Литература

1. Рамазанова Р. Шәймардан Н., Саурбаева Б.С., Тантыбаева Б.С., Мамяченков С.В.. Жәйрем кен

орнының тотыққан қорғасын-мырыш кенінің заттық құрамы мен байытылуын зерттеу// ШҚТУ хабаршысы. -2025. - № 2. -Б.39-51. DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_39.

2. Chepushtanova T., Motovilov I., Merkibayev Y., Polyakov K., Gostu S. Flotation studies of the middling product of lead-zinc ores with preliminary sulfidizing roasting of oxidized lead and zinc compounds // Complex use of mineral resources. -2022. -T.323 (4). -P.77-83. DOI 10.31643/2022/6445.43.

3. Mambetaliyeva A., Tussupbekova T., Sabirova L., Makasheva G., Rysbekov K., Barmenshinova M. Study of oxidative–reductive potential changes in the enrichment of oxidized polymetallic ores // Applied Sciences. -2025. -Vol.15(11): 6091. DOI 10.3390/app15116091.

4. Qiu X., Hongying Y., Guobao C., Shuiping Z., Chuangkai C., Lan B. Inhibited mechanism of carboxymethyl cellulose as a galena depressant in chalcopyrite and galena flotation // Minerals Engineering. -2020. -Vol. 150: 106270. DOI 10.1016/j.mineng.2020.106273 .

5. Kamran Haghighi H., Jafarian Mohammadi, S.M.J., Salarirad M.M. Promoted Flotation of Lead and Silver Oxidized Minerals Using a Synergetic Combination of Collectors// Journal of Sustainable Metallurgi. -2024. - Vol.10. - P.1507-1527. DOI 10.1007/s40831-024-00867-6.

6. Xiaoqin T., Jianhua Ch., Ye Ch. A density functional based tight binding (DFTB+) study on the sulfidization-xanthate flotation mechanism of cerussite // Applied Surface Science. - 2023. - Vol.612: 155677. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.155677.

7. Bulatovic S. Flotation of mixed lead zinc sulphide oxide and oxide lead and zinc ores // Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice. -2010. -P.67-86. DOI 10.1016/B978-0-444-53082-0.00020-2.

8. Li J., Liu S., Liu D., Liu R., Liu Zh., Jia X., Chang T. Sulfidization mechanism in the flotation of cerussite: A heterogeneous solid-liquid reaction that yields PbCO3/PbS core-shell particles // Minerals Engineering. - 2020. -Vol.153: 106400. DOI 10.1016/j.mineng.2020.106400.

9. Ko M., Kirakosyan A., Kim H-U., Seok H., Chai J., Jean N. A new nanoparticle heterostructure strategy with highly tunable morphology via sequential infiltration synthesis // Applied Surface Science. -2022. -Vol.593: 153387. DOI 10.1016/j.apsusc.2022.153387.

10. Liu Zh., Feng Y., Li H. Application of titanium phosphate prepared from acidic titanium dioxide wastewater to remove cerium (III) in aqueous solution // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. -2021. -Vol.630: 127613. DOI 10.1016/j.colsurfa.2021.127613.

11. Chen Y., Sun Y., Han Y. Efficient flotation separation of lead–zinc oxide ores using mineral sulfidation reconstruction technology: A review // Green and Smart Mining Engineering. -2024. -Vol.1(2). -P.175-189. DOI 10.1016/j.gsme.2024.05.004.

12. Elizondo-Álvarez M.A., Uribe-Salas A., Nava-Alonso F. Flotation studies of galena (PbS), cerussite (PbCO3) and anglesite (PbSO4) with hydroxamic acids as collectors // Minerals Engineering. -2020. -Vol. 155: 106456. DOI 10.1016/j.mineng.2020.106456.

13. Silin I., Hahn K.M., Gursel D., et al. Mineral processing and metallurgical treatment of lead vanadate ores // Minerals. -2020. -Vol. 10(2). DOI 10.3390/min10020197.

14. Мамбеталиева А.Р., Мухтаркызы А., Шаутенов М.Р. Натрий сульфидінің қосқұдық кен орын-дарының тотыққанқорғасын-мырыш кендеріне әсерін зерттеу // ҚазТБУ Хабаршысы. -2025. -Т.1 (26). -Б.390-399. DOI 10.58805/kazutb.v.1.26-603.

Referenses

1. Ramazanova R. Shajmardan N., Saurbaeva B.S., Tantybaeva B.S., Mamjachenkov S.V.. Zhajrem ken ornynyң totyққan qorgasyn-myrysh keninin zattyq қuramy men bajytyluyn zertteu// ShQTU habarshysy. -2025. - № 2. -B.39-51. DOI:= 10.51885/1561-4212_2025_2_39. [in Kazakh]

2. Chepushtanova T., Motovilov I., Merkibayev Y., Polyakov K., Gostu S. Flotation studies of the middling product of lead-zinc ores with preliminary sulfidizing roasting of oxidized lead and zinc compounds // Complex use of mineral resources. -2022. -T.323 (4). -P.77-83. DOI 10.31643/2022/6445.43.

3. Mambetaliyeva A., Tussupbekova T., Sabirova L., Makasheva G., Rysbekov K., Barmenshinova M. Study of oxidative–reductive potential changes in the enrichment of oxidized polymetallic ores // Applied Sciences. -2025. -Vol.15(11): 6091. DOI 10.3390/app15116091.

4. Qiu X., Hongying Y., Guobao C., Shuiping Z., Chuangkai C., Lan B. Inhibited mechanism of carboxymethyl cellulose as a galena depressant in chalcopyrite and galena flotation // Minerals Engineering. -2020. -Vol. 150: 106270. DOI 10.1016/j.mineng.2020.106273 .

5. Kamran Haghighi H., Jafarian Mohammadi, S.M.J., Salarirad M.M. Promoted Flotation of Lead and Silver Oxidized Minerals Using a Synergetic Combination of Collectors// Journal of Sustainable Metallurgi. -2024. - Vol.10. - P.1507-1527. DOI 10.1007/s40831-024-00867-6.

6. Xiaoqin T., Jianhua Ch., Ye Ch. A density functional based tight binding (DFTB+) study on the sulfidization-xanthate flotation mechanism of cerussite // Applied Surface Science. -2023. -Vol.612: 155677. DOI 10.1016/j.apsusc.2022.155677.

7. Bulatovic S. Flotation of mixed lead zinc sulphide oxide and oxide lead and zinc ores // Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice. -2010. -P.67-86. DOI 10.1016/B978-0-444-53082-0.00020-2.

8. Li J., Liu S., Liu D., Liu R., Liu Zh., Jia X., Chang T. Sulfidization mechanism in the flotation of cerussite: A heterogeneous solid-liquid reaction that yields PbCO3/PbS core-shell particles // Minerals Engineering. - 2020. -Vol.153: 106400. DOI 10.1016/j.mineng.2020.106400.

9. Ko M., Kirakosyan A., Kim H-U., Seok H., Chai J., Jean N. A new nanoparticle heterostructure strategy with highly tunable morphology via sequential infiltration synthesis // Applied Surface Science. -2022. -Vol.593: 153387. DOI 10.1016/j.apsusc.2022.153387.

10. Liu Zh., Feng Y., Li H. Application of titanium phosphate prepared from acidic titanium dioxide wastewater to remove cerium (III) in aqueous solution // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. -2021. -Vol.630: 127613. DOI 10.1016/j.colsurfa.2021.127613.

11. Chen Y., Sun Y., Han Y. Efficient flotation separation of lead–zinc oxide ores using mineral sulfidation reconstruction technology: A review // Green and Smart Mining Engineering. -2024. -Vol.1(2). -P.175-189. DOI 10.1016/j.gsme.2024.05.004.

12. Elizondo-Álvarez M.A., Uribe-Salas A., Nava-Alonso F. Flotation studies of galena (PbS), cerussite (PbCO3) and anglesite (PbSO4) with hydroxamic acids as collectors // Minerals Engineering. -2020. -Vol. 155: 106456. DOI 10.1016/j.mineng.2020.106456.

13. Silin I., Hahn K.M., Gursel D., et al. Mineral processing and metallurgical treatment of lead vanadate ores // Minerals. -2020. -Vol. 10(2). DOI 10.3390/min10020197.

14. Mambetalieva A.R., Muhtarkyzy A., Shautenov M.R. Natrij sul’ fidinin qosqudyq ken oryndarynyn totyqqanqorgasyn-myrysh kenderine aserin zertteu // QazTBU Habarshysy. -2025. -T.1 (26). -B.390-399. DOI 10.58805/kazutb.v.1.26-603. [in Kazakh]

Сведения об авторах

Мамбеталиева А.Р. - доктор PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: a.mambetaliyeva@satbayev.university;

Макашева Г.К. - докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: mguldanka@mail.ru;

Сабирова Л.Б. - кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: l.sabirova@satbayev.university;

Тусупбекова Т.Ш. - начальник лаборатории обогащения ТОО «КазГидроМедь», Караганда, Казахстан, e-mail: tansholpan_87.09@mail.ru;

Танабаева А.Ж.- докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.Сатпаева, Алматы, Казахстан, e-mail: i_love_mamy@bk.ru.

Information about the authors

Mambetaliyeva A.R. - PhD, Associate Professor, K.Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: a.mambetaliyeva@satbayev.university;

Makasheva G.K., Doctoral student, K.Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: mguldanka@mail.ru;

Sabirova L.B. - Candidate of technical sciences, K.Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: l.sabirova@satbayev.university;

Tusupbekova T.Sh. - Head of the Enrichment Laboratory at KazHydroMed LLP, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: tansholpan_87.09@mail.ru;

Tanabaeva A.Zh. - Doctoral student, K.Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: i_love_mamy@bk.ru.