

Исследование технологии бактериального выщелачивания меди из бедных медьсодержащих отвалов

В работе приведены результаты экспериментов по кучному выщелачиванию меди из рудного сырья с предварительным бактериальным окислением; в качестве биоокислителя также использовалась культура *A.ferrooxidans*. Проведены исследования по адаптации и культивированию технологически эффективного штамма *A.ferrooxidans*. Также в качестве альтернативного химического окислителя был рассмотрен вариант применения трихлоризоциануровой кислоты (ТХЦК). Данные по извлечению меди приведены в сравнении со стандартным сернокислотным выщелачиванием в качестве контрольного варианта. В результате применения химического метода окисления с использованием ТХЦК рост извлечения меди в раствор по сравнению с другими вариантами наблюдался только в течение первых 10 дней. В результате за 30 дней выщелачивания показатель извлечения меди составил 52,83 %. За аналогичный период стандартным сернокислотным выщелачиванием было извлечено меди 62,17 %. Наибольшая результативность наблюдалась в варианте предварительного бактериального окисления за 30 дней выщелачивания, в продуктивный раствор было извлечено 76,08 % меди. На стадии электролиза из наработанных растворов электролитов было проведено катодное осаждение меди с выходом металла по току 94,6 %.

Ключевые слова: бактериальное окисление, *A.ferrooxidans*, трихлоризоциануровая кислота, электролиз, электролит, экстракция, реэкстракция продуктивный раствор.

КОЙЖАНОВА АЙГУЛЬ КАЙРГЕЛЬДЫЕВНА, кандидат технических наук, заведующая лабораторией спецметодов гидрометаллургии, a.koizhanova@satbayev.university, aigul_koizhan@mail.ru

МАГОМЕДОВ ДАВИД РАСИМОВИЧ, магистр, младший научный сотрудник, d.magomedov@stud.satbayev.university

ЕРДЕНОВА МАРИЯ БЕЙСЕНБЕКОВНА, магистр, m.erdenova@satbayev.university

АБДЫЛДАЕВ НУРГАЛИ НУРЛАНОВИЧ, бакалавр, ведущий инженер, nur.ab.kz@mail.ru, n.abdyldaev@satbayev.university

БАКРАЕВА АКБОТА НУРЛАНОВНА, магистр

Казахский национальный технический университет имени Сатбаева, АО «Институт металлургии и обогащения», г. Алматы, Казахстан

Investigation of the process of leaching copper from copper-containing dumps using bio-oxidants

A. K. KOIZHANOVA, D. R. MAGOMEDOV, M. B. ERDENOVA, N. N. ABDYLDAEV, A. N. BAKRAEVA

Satbayev University, The Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

The paper presents the results of experiments on bulk copper leaching with preliminary bacterial oxidation of initial ore. As a culture of bio-oxidant, we used *A.ferrooxidans*. Studies on the adaptation and cultivation of a technologically efficient strain of *A.ferrooxidans* have been carried out. As an alternative chemical oxidizer, the use of trichloroisocyanuric acid (THCC) was considered. Standard sulfuric acid leaching served as a control option. As a result of the application of the chemical oxidation method using THCC, an increase in the extraction of copper into solution compared to other options was observed only during the first 10 days. As a result, over 30 days of leaching, the copper recovery rate was 52,83%. During the same period, 62,17% of copper was extracted by standard sulfuric acid leaching. The greatest efficiency was observed in the variant of preliminary bacterial oxidation. During 30 days of leaching, 76,08% of copper was extracted into the productive solution. At the electrolysis stage, 30,8 g of copper was deposited on the cathode from the accumulated electrolyte solutions, which gives a current recovery equal to 94,6%.

Key words: bacterial oxidation, *A.ferrooxidans*, trichloroisocyanuric acid, electrolysis, electrolyte, extraction, re-extraction, productive solution.

Введение. Характерной особенностью большинства медных месторождений Казахстана являются уменьшение запасов богатого сырья, а также накопление значительных объёмов забалансовых отвалов с низким содержанием меди 0,1–0,5%, что делает процесс пирометаллургической плавки подобного сырья нерентабельным. Для переработки руд и отвалов с низким содержанием меди, преимущественно находящейся в сульфидной форме, успешно применяется практика флотационного обогащения. Для переработки забалансового медного сырья, представленного в основном окисленной формой медьсодержащих минералов, используется стандартная гидрометаллургическая технология, включающая сернокислотное выщелачивание, с последующей жидкостной экстракцией и электролизом. Однако, помимо забалансовых руд и отвалов, имеющих явно выраженную сульфидную или окисленную форму нахождения меди в минералах, встречаются многочисленные месторождения со сложным минеральным составом. В большинстве случаев для сложного состава таких месторождений характерно нахождение меди в окисленной минеральной форме при одновременно достаточно высоком содержании различных примесей сульфидных и железосодержащих минералов, таких как пирит, арсенопирит и прочие. Отсутствие же сульфидных медных минералов исключает возможность флотационного обогащения. В то же время присутствие в минеральном составе сырья сульфидов других металлов, в частности железа, способно вызывать затруднения при стандартной гидрометаллургической переработке. Несмотря на то, что окисленные формы меди легко переходят в раствор при сернокислотном выщелачивании, присутствующие в минералогическом составе руды (отвала) сульфиды двухвалентного железа и других элементов будут в значительной степени повышать расход серной кислоты в процессе гидрометаллургической переработки. Кроме того, присутствие минералов, имеющих в своём составе различные комбинации железа, кальция, карбонатов и силикатов (тремолит, клинохлор, кальцит и др.) способно также оказать негативное влияние на процесс выщелачивания серной кислотой.

Современная стандартная технология кучного выщелачивания и жидкостной экстракции меди подробно раскрыта в ряде работ отечественных и зарубежных исследователей [3–5, 7, 9, 10]. В большинстве случаев стандартная гидрометаллургическая технология получения меди ограничивается возможностью применения лишь на окисленном сырье простого состава, с низким содержанием соединений двухвалентного железа. Присутствие железа в двухвалентной форме, в виде минералов пирита, пир-

ротина и других соединений, значительно затрудняет процесс выщелачивания, также повышая расход основного выщелачивающего реагента – серной кислоты. Это приводит к необходимости предварительной обработки сырья окисляющими реагентами и перевода железа в окисленную трёхвалентную форму. Использование химических окислителей, например, таких как пероксид натрия, гипохлорит калия, применяемых в процессе выщелачивания благородных металлов, в случае с медным сырьём нерентабельно. В настоящее время большое значение придаётся применению бактерий при извлечении меди из руды. Под термином «бактериальное выщелачивание» подразумевается предварительная биопереработка руд микроорганизмами. Показано, что адаптация бактерий перед биовыщелачиванием повышает эффективность процесса.

Широко известна роль бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* в процессах выщелачивания сульфидных руд. При биоготехнологическом процессе металлы из нерастворимых в воде сульфидов переходят в растворимые сульфаты. Тионовые бактерии *Thiobacillus ferrooxidans* окисляют все сульфиды металлов. Необходимый для роста бактерий углерод они получают из углекислого газа. Эти бактерии развиваются в кислой среде (рН в диапазоне 1,0–4,8) при температурах от 3 до 40 °С. Оптимальные параметры развития бактерий – величина рН лежит в пределах 2–3, температура 28 °С. Тионовые бактерии встречаются в месторождениях серных и сульфидных руд. Но свою активность они проявляют в присутствии кислорода [11, 20, 22]. В качестве главных преимуществ бактериального окисления можно отметить высокую эффективность перевода двухвалентного железа в трёхвалентное, а также недорогую стоимость данной технологии.

В процессе разработки технологии биовыщелачивания, необходимо учитывать резко континентальный климат месторождений Казахстана. Несмотря на то, что наибольшее распространение данная технология приобрела в ЮАР, Австралии, странах Южной Америки, показательным будет также пример финской компании *Talvivaara*, которая в условиях северных широт в 2009–2010 гг. при внедрении биохимической технологии на месторождении Колмисоппи добилась увеличения производства меди в 2,7 раз [12]. Другие современные методы бактериального разложения минеральных составляющих медьсодержащих руд описаны в работах [14, 15, 18, 21].

Экспериментальные методы и результаты. Объекты исследования – медьсодержащая руда отвала, бактерии классов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Thiobacillus ferrooxidans*. Работа заключается в разработке технологии применения бактерий в качестве

катализирующего окислительные процессы фактора позволит в значительной степени повысить степень извлечения меди в продуктивный раствор.

Адаптация и рост бактериальной культуры *A. ferrooxidans*, как правило, сопровождается определёнными изменениями в параметрах раствора [1, 6, 13, 16, 17, 19], в частности, наблюдается активное снижение концентрации Fe^{2+} и увеличение ионов Fe^{3+} . Зачастую соединения меди являются токсичными для стандартного штамма *A. ferrooxidans*, что требует дополнительной микробиологической селекции с выращиванием адаптированной культуры. Штаммы *A. ferrooxidans*, адаптированные к условиям медного сырья, позволяют производить биовыщелачивание сульфидов с упором на сульфиды меди. Известен образец штамма *Acidithiobacillus ferrooxidans*-1333, выведенный в Korean Centre for Culture Collection, показавший высокие результаты окисления Fe^{2+} в составе халькопирита за счёт высокой иммобилизации бактерий к специфике данного минерала [2, 8].

Обсуждение результатов. При наработке раствора для биохимического окисления рудного материала осуществлялась предварительная селекция бактериального штамма *A. ferrooxidans*, адаптированного к особенностям химического и минералогического состава медного сырья. В процессе адаптации штаммов к минеральному сырью, после 10 дней анализировалось количество выживших бактериальных клеток, а также увеличение концентрации железа в степени окисления 3^+ , указывающей на активный метаболизм микроорганизмов (рис. 1).

По результатам селекции, было отобрано три основных адаптированных штамма, из которых наибольшую активность продемонстрировал штамм 3 (рис. 2).

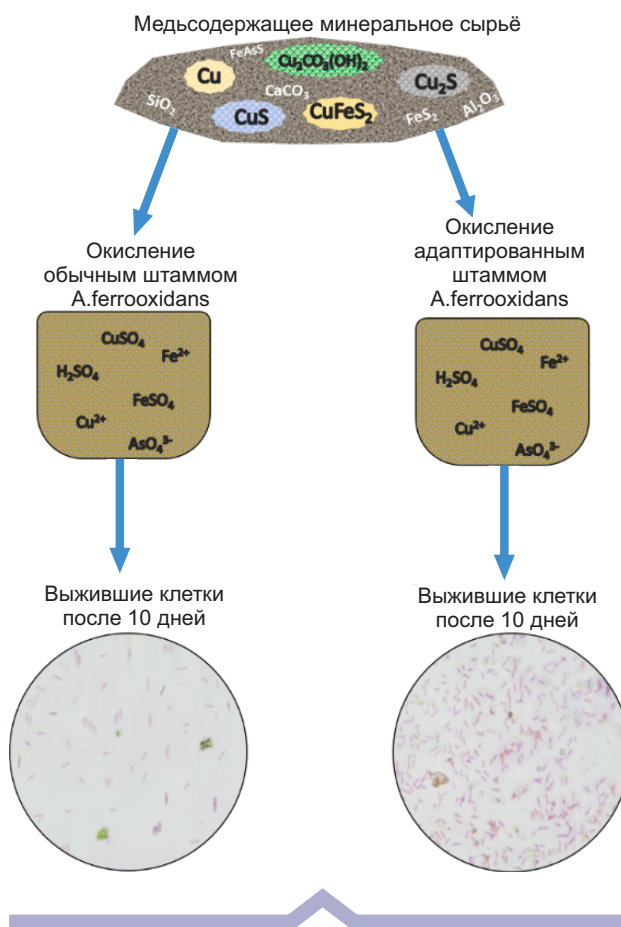


Рис. 1. Селекция адаптированного штамма *A. ferrooxidans* к химическому составу медного минерального сырья

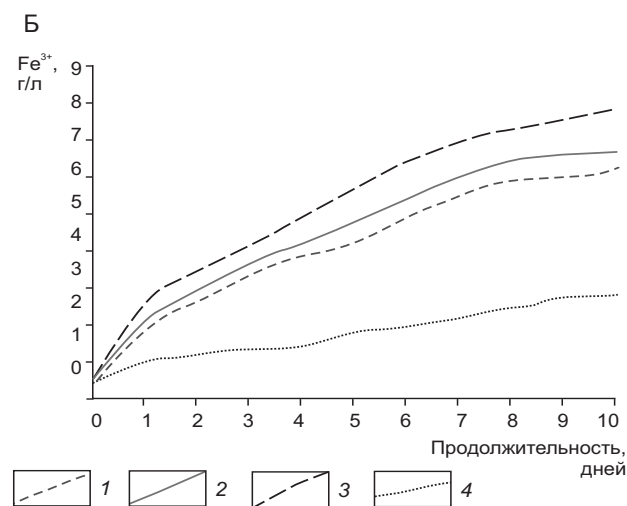


Рис. 2. Селекция и адаптация штаммов *A. ferrooxidans* к медному минеральному сырью:

А – наращивание штаммов *A. ferrooxidans* в пульпе медного минерального сырья; Б – увеличение концентрации Fe^{3+} при окислении пульпы бактериальными штаммами 1, 2, 3; 4 – только кислород (O_2) воздуха

1. Элементный состав образцов проб отвала и смешанной пробы образцов с заданными массовыми соотношениями, %

Элемент	Малахит	Конгломерат	Алевролит	Песчаник	Смешанная проба, фактическое	Смешанная проба, теоретическое
O	53,64	50,979	54,209	52,471	50,339	52,777
Na	1,119	1,318	1,802	1,079	1,567	1,4419
Mg	1,246	0,642	1,368	1,331	1,103	1,13485
Al	5,806	3,485	6,789	6,975	4,867	5,79515
Si	22,022	27,846	27,843	25,795	25,708	27,041
P	0,054	0,048	0,062	0,068	0,053	0,0589
S	0,269	0,031	0,116	0,026	0,479	0,07565
Cl	0,012	0,015	0,013	0,015	0,026	0,01405
K	1,147	0,579	1,199	1,662	0,834	1,126
Ca	5,953	5,162	0,855	2,12	3,044	2,718
Ti	0,435	0,239	0,476	0,522	0,312	0,414
V	0,006	0,006	0,007	0,01	0	0,0074
Mn	0,178	0,132	0,066	0,163	0,123	0,116
Fe	2,921	1,38	2,676	3,797	2,289	2,579
Cu	0,448	0,103	0,178	0,028	0,15	0,1315
Zn	0,014	0,007	0,013	0,015	0,024	0,0117
Rb	0,009	0,003	0,007	0,012	0,005	0,00715
Sr	0,011	0,007	0,007	0,014	0,01	0,00895
Zr	0,01	0,006	0,011	0,013	0,01	0,00995
Pb	0,006	0	0	0,016	0,01	0,0043

Таким образом, для дальнейшего эксперимента по бактериальному окислению медной руды был выбран адаптированный штамм *A. ferrooxidans*. В большинстве случаев химический состав медных руд оказывается в некоторой степени губительным для бактериальных клеток. В частности, негативно сказываются на росте и метаболизме бактерий ионы меди Cu^{2+} и ряд соединений мышьяка, получаемых также при разложении арсенопирита.

Проведение экспериментов по перколяционному выщелачиванию предполагает лабораторную имитацию кучного выщелачивания. С этой целью с отвала месторождения г. Сатпаев был произведён дополнительный отбор проб минерального сырья. Всего было отобрано 4 варианта технологических проб, представляющих различные составные фрагменты отвала: 1) порода со значительными включениями малахита; 2) проба, представленная в основном конгломератом; 3) проба, представленная алевролитом; 4) проба песчаника, сосредоточенная по большей части у основания отвала.

Перед началом перколяционного метода были подобраны базовые параметры процесса выщелачива-

ния: концентрация серной кислоты в выщелачивающем растворе – 2,5%, плотность орошения – 10 л/м² в час. Также перед основным орошением серной кислотой производилось влагонасыщение пробы и расчёт влагоёмкости. Объём перколятора – 30 л, масса выщелачиваемого материала – 20 кг и крупность – 25–30 мм.

В целях равномерного распределения и впитывания раствора на поверхность пробы кладётся фильтрткань или фильтровальная бумага с диаметром, соответствующим диаметру колонны. Подача раствора в колонну может осуществляться перистальтическим насосом либо другой системой капельной подачи. Шланг подачи раствора фиксируется по центру фильтровальной бумаги или фильтрткани. Интенсивность подачи и необходимый объём раствора устанавливаются в зависимости от заданной плотности орошения. Для дальнейших расчётов необходимо знать площадь орошения в колонне. Площадь орошения вычисляется по формуле: $S = \pi R^2$. Вычислив площадь орошаемой поверхности и зная заданную плотность орошения л/м² в час, рассчитываем объём.

2. Результаты фазового состава отвала

Название компонента	Формула	Содержание, %
Кварц (syn)	SiO ₂	73,9
Альбит	NaAl _{0,91} Si ₃ O ₈	10,2
Малахит (syn)	Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃	9,1
Клинохлор-1МПб, (ferroan)	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	4,0
Мусковит	H ₄ K ₂ (Al, Fe) ₆ Si ₆ O ₂₄	2,7

Загрузка проб рудного материала отвала в перколяторы осуществлялась в следующих массовых соотношениях (в %): малахит – 5, конгломерат – 30, алевролит – 40, песчаник – 25. Все породы перед загрузкой предварительно перемачивались и усреднялись, за исключением песчаника: 10 % загружались на дно перколятора в качестве имитации основания отвала, остальные 15 % равномерно перемешивались с остальной рудной массой. Пробы каждого образца породы по отдельности и смешанная рудная масса для загрузки предварительно подвергалась рентгенофлуоресцентному анализу. По результатам анализов, представленных в таблице 1, были получены составы каждого отдельного образца и смешанной усреднённой пробы, проведены расчёты теоретического состава смешанной пробы в зависимости от массовых соотношений образцов.

После определения элементного состава в пробах медного отвала рентгенофазовым анализом определялись основные фазовые компоненты, представленные различными минеральными включениями. Анализ проводился на дифрактометре D8 Advance (BRUKER), излучение Cu-Kα. Результаты рентгенофазового анализа представлены в таблице 2.

По данным рентгенофазового анализа установлено, что основная масса породообразующего материала представлена кварцем. В заметных количествах присутствуют также альбит, малахит, клинохлор и мусковит.

Детальный минералогический анализ пробы позволил обнаружить присутствие в образце сульфидных соединений, таких как пирит, халькозин, а также фрагменты самородной меди. Образцы пробы изучались минералогическим методом в отражённом свете с использованием микроскопа OLIMPUS-BX 51. Вся основная масса нерудная, имеет относительно большие размеры по сравнению с рудным материалом. В образце из сульфидных соединений встречается пирит и халькозин (рис. 3).

В итоге смешанная руда медного отвала была загружена в три перколятора для отработки трёх вариантов перколяционного выщелачивания (рис. 4): 1) стандартное сернокислотное выщелачивание без дополнительного окисления; 2) выщелачивание с предварительным бактериальным окислением; 3) выщелачивание с предварительным химическим окислением.

Окисление минерального сырья производилось на стадии влагонасыщения: так, в перколятор с вариантом бактериального окисления был залит раствор с культурой *A. ferrooxidans* в питательной среде, адаптированный к соединениям меди, в перколяторе с химическим окислением использовался 0,5% раствор трихлоризоциануровой кислоты. Главным действующим веществом в ТХЦК является хлор, составляющий более 90% от общего удельного веса готового продукта. При использовании в качестве выщелачивающего или окисляющего агента он способствует переводу меди в продуктивный раствор.

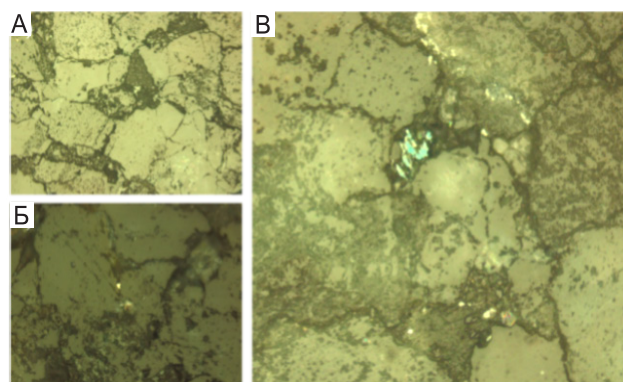


Рис. 3. Фотографии минералогического анализа пробы:

А – обзорный снимок пробы. Увеличение $\times 40$; Б – пирит в прожилках нерудной массы; В – халькозин в сростке нерудного минерала. Увеличение $\times 200$



Рис. 4. Загруженные перколяторы для трёх вариантов выщелачивания

В перколятор с вариантом без предварительного окисления в качестве влагонасыщения был залит слабый 0,5% раствор серной кислоты.

Влагонасыщение во всех трёх вариантах составило 10%. После влагонасыщения и окислительной обработки был запущен процесс выщелачивания. Подача раствора серной кислоты с концентрацией 25 г/л осуществлялась перистальтическими насосами, в соответствии с заданной базовой плотностью орошения – 10 л/м² в час. Объёмы оборотных растворов составляли 2 л. После прохождения через рудный материал в перколяторе производился замер объёмов получаемых продуктивных растворов, анализировалось остаточное содержание серной кислоты и концентрация ионов меди. Продуктивные растворы доукреплялись до концентрации серной кислоты 25 г/л и доводились до объёма 2 л, после чего использовались в новом оборотном цикле выщелачивания.

Первое экстракционное извлечение меди из продуктивных растворов было произведено после 15 дней выщелачивания. К тому моменту в растворах были накоплены достаточно высокие концентрации меди (> 3 г/л), что замедляло дальнейшее извлече-

ние меди в раствор. После экстракции выщелачивание продолжалось рафинатом, полученным в процессе извлечения меди органикой из продуктивного раствора. Последующая экстракция была произведена на завершающем этапе перколяционного выщелачивания после 30 дней выщелачивания. Результаты перколяционного выщелачивания и динамика извлечения меди в продуктивный раствор, простым и окислительными методами выщелачивания приведены в таблице 3 и на рисунке 5.

Из данных таблицы и графика видно, что на начальном этапе выщелачивания, первые 5 дней, извлечение меди находится примерно на одинаковом уровне. Затем в течение нескольких дней наблюдалось увеличение извлекаемой меди в раствор в перколяторе с химическим окислением. Применение катализирующей бактериальной культуры *A. ferrooxidans* ускоряет окислительные процессы и повышает степень извлечения меди в среднем на 8–10%. В то время в перколяторе с бактериальным окислением на поверхности фрагментов руды фиксировалось образование налёта, характерного для продуктов жизнедеятельности железобактерий. Это также свидетельствовало об образовании

3. Извлечение меди разными методами выщелачивания, %

Метод выщелачивания	Продолжительность, дней					
	5	10	15	20	25	30
Без окисления, только H ₂ SO ₄ 25 г/л	13,35	22,83	36,33	50,92	58,08	62,17
<i>A. ferrooxidans</i> + H ₂ SO ₄ 25 г/л	13,84	32,78	37,41	68,17	72,17	76,08
ТХЦК + H ₂ SO ₄ 25 г/л	14,0	25,56	24,15	40,67	46,75	52,83

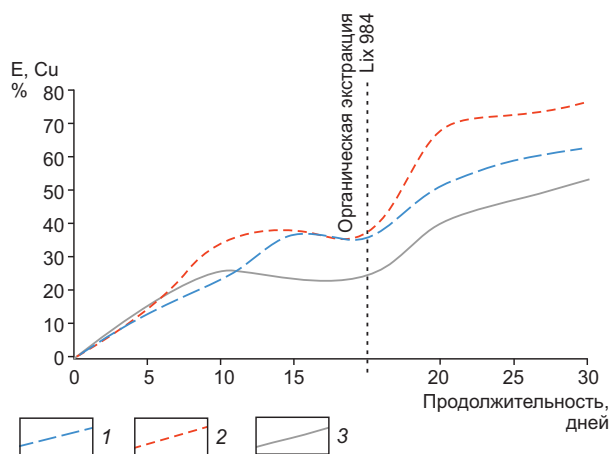


Рис. 5. Динамика извлечения меди в раствор:

1 – без окисления, только H_2SO_4 25 г/л; 2 – *A.ferrooxidans* + H_2SO_4 25 г/л; 3 – ТХЦК + H_2SO_4 25 г/л

на рудных частицах бактериальных колоний адаптированного штамма *A.ferrooxidans*, которые продолжали оказывать окисляющее воздействие на минералы даже в процессе сернокислотного выщелачивания.

По достижению в растворах концентраций меди в диапазоне 3–4 г/л интенсивность извлечения в оборотные продуктивные растворы временно начала снижаться. Для восстановления динамики извлечения меди в раствор была поставлена серия экспериментов по экстракции и реэкстракции, что позволило осуществить перенос органической фазой части

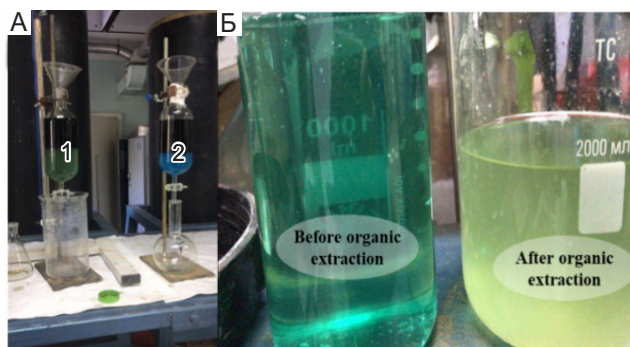


Рис. 6. Процессы экстракции и реэкстракции, отстаивание и разделение в воронках:

А – разделение водной и органической фаз в делительных воронках: 1 – экстракция, 2 – реэкстракция; Б – изменение цвета продуктивного раствора

растворенной меди из продуктивных растворов в электролиты. Экстракция производилась селективным на медь экстрагентом Lix 984, растворенным в соотношении 10 % в органическом растворителе Escaid. Соотношение водной и органической фаз на стадии экстракции составляло В:О = 1:1, на стадии реэкстракции В:О = 3:5. Разделение и отстаивание фаз осуществлялось в делительных воронках (рис. 6).

Концентрация меди в полученных при реэкстракции электролитах соответствовала требуемым параметрам (не менее 30 г/л и не более 60 г/л), все полученные электролиты использовались для следующей технологической стадии – электроосаждения меди в электролизной ванне. Сила тока составляла 2,5 А. Для осаждения использовался медный катод с изначальной массой 94,2 г, в качестве анодов служили нерастворимые свинцовые пластинки. Установка для проведения электролиза представлена на рисунке 7.

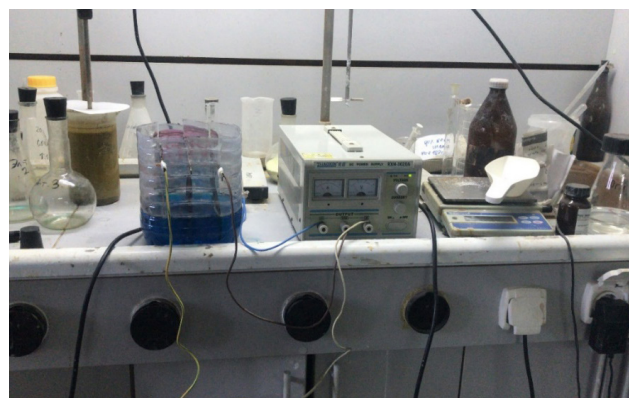


Рис. 7. Установка для проведения эксперимента по электролизу

$A = 0,329 \text{ мг/А} \times \text{сек.}$ – электрохимический эквивалент меди. Процесс электролиза длился 11 часов. Теоретический выход металла при электролизе рассчитывается по формуле:

$$G = A \times I \times t,$$

где G – количество выделенного вещества, I – сила электрического тока, A , t – время, сек.

$$G = 0,329 \text{ мг/А сек} \times 2,5 \text{ А} \times 11 \times 60 \times 60 = 32571 \text{ мг} = 32,571$$

По завершению процесса электролиза масса катода составила 125 г (рис. 8).



Рис. 8. Увеличение массы медного катода при электролизе с 94,2 до 125 г

Таким образом, на катоде было получено 30,8 г меди. Извлечение меди по току при этом составляет:

$$E_{\text{Cu}} = G_{\text{практ.}} / G_{\text{теор.}} \times 100\% = 30,8 / 32,571 \times 100\% = 94,6\%.$$

Выводы. Эксперименты по перколяционному выщелачиванию меди показали высокую эффективность при применении предварительного бактериального окисления, в качестве биоокислителя исполь-

зовалась адаптированная культура *A.ferrooxidans*. В качестве альтернативного химического окислителя был рассмотрен вариант применения трихлоризоциануровой кислоты (ТХЦК), в качестве биоокислителя также использовалась адаптированная культура *A.ferrooxidans*. Стандартное серноокислотное выщелачивание служило в качестве контрольного варианта. В результате применения химического метода окисления с использованием ТХЦК рост извлечения меди в раствор по сравнению с другими вариантами наблюдался только в течение первых 10 дней. В результате за 30 дней выщелачивания показатель извлечения составил 52,83%. За аналогичный период стандартным серноокислотным выщелачиванием было извлечено 62,17% меди. Наибольшая результативность наблюдалась в варианте предварительного бактериального окисления, за 30 дней выщелачивания в продуктивный раствор было извлечено 76,08% меди. На стадии электролиза из наработанных растворов электролитов было осаждено на катоде 30,8 г меди, что даёт извлечение по току, равное 94,6%.

Министерство образования и Науки Республики Казахстан оказало финансовую поддержку данной работе в рамках грантового финансирования АР09258789.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абубакриев А. Т., Магад Е., Игнатъев М. М., Койжанова А. К., Есимова Д. М.* Отработка оптимальных параметров и режимов выщелачивания медьсодержащих руд Байского месторождения // Ресурсосберегающие технологии в обогащении руд и металлургии цветных металлов: материалы Международной конференции, Алматы, 14–17 сентября 2015 г. – Астана : ТОО «Арко», 2015. – С. 172–175.
2. *Бакаева М. Д., Столярова Е. А., Логинов О. Н.* Извлечение металлов из отвалов Медногорского медносерного комбината с помощью биотехнологии // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 10. – С. 533–535.
3. *Бейсембаев Б. Б., Кенжалиев Б. К.* Теория и практика использования методов геотехнологии для переработки забалансовых и некондиционных медных руд // Комплексное использование минерального сырья. – 1999. – № 4. – С. 93–98.
4. *Водолазов Л. И., Дробащенко В. П., Лобанов Д. П., Малухин Н. Г.* Геотехнология. Кучное выщелачивание бедного минерального сырья. – М. : МГГА, 2000. – 300 с.
5. *Гиганов Г. П., Яринова Т. И.* Использование экстракции в гидрометаллургии меди за рубежом // Цветная металлургия. – 1998. – № 6. – С. 45–47.
6. *Заявка 5207996 США, МКИ С01G 3/00.* Кислотное кучное выщелачивание медных руд с добавкой фторо-
7. *Игнатъев М. М.* Разработка экстракционной технологии получения меди из растворов выщелачивания руд месторождения Актогай: диссертация на соискание учебной степени канд. техн. наук. – Алма-Ата, 1989. – 173 с.
8. *Патент на изобретение КЗ № 32300.* Способ извлечения меди из техногенных продуктов / З. С. Абишева, М. М. Игнатъев, А. Куанбай, А. К. Койжанова, Г. А. Арыстанова, Д. Р. Магомедов. – заявл. 09.02.2016; опубл. 15.08.2017. – бюл. 15.
9. *Санакулов К. С.* Перспективы переработки окисленных медных руд месторождения Кальмакыр // Горный вестник Узбекистана. – 2009. – № 3. – С. 47–49.
10. *Халезов Б. Д.* Исследования и разработка технологии кучного выщелачивания медных и медно-цинковых руд: Специальность 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов»: диссертация на соискание учебной степени докт. техн. наук. – Екатеринбург : ГУ «Институт металлургии Уральского отделения РАН», 2008. – 548 с.
11. *Gentina J. C., Acevedo F.* Application of bioleaching to copper mining in Chile // Electronic Journal of Biotechnology. – 2013. – V. 16, № 3. DOI: 10.2225/vol16-issue3-fulltext-12.
12. *Hayes A.* Top of the heap // Mining Magazine. – June 2011. – P. 62–68.

13. *Koizhanova A. K., Magomedov D. R., Tastanov E. A., Kenzhaliyev B. K., Sedelnikova G. V., Berkinbayeva A. N.* Intensification of copper leaching from heaps using biological oxidation // *Metalurgija*. – 2022. – V. 61, № 3–4. – P. 789–792.
14. *Lin M., Yang B., Lin H., Liu S., Wang J.* Catalytic Effects of Red Mud and Acidithiobacillus ferrooxidans on Biodissolution of Pyrite // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – V. 768 (1). – 012019.
15. *Lyu X., Zhao H., Zhang Y., Yan Z., Zhao Y., Zheng H., Liu W., Xie J., Qiu G.* Active destruction of pyrite passivation by ozone oxidation of a biotic leaching system // *Chemosphere*. – 2021. – V. 277. – 130335.
16. *Magomedov D. R., Magad E., Ignatiev M. M., Koizhanova A. K., Zhanabay Zh.* Extraction of copper and precious metals from waste copper dumps of the Sayak deposit // *Complex Use of Mineral Resources*. – 2016. – № 4. – P. 30–34.
17. *Mukhanova A., Tussupbayev N., Turysbekov D., Yessengaziyev A.* Improvement of the selection technology of copper-molybdenum concentrate with the use of modified flocculants // *Metalurgija*. – 2022. – V. 61, № 1. – P. 221–224.
18. *Santaolalla A., Gutierrez J., Gallastegui G., Barona A., Rojo N.* Immobilization of Acidithiobacillus ferrooxidans in bacterial cellulose for a more sustainable bioleaching process // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – V. 9, № 4. – 105283.
19. *Song C.-I., Jo C.-M., Ri H.-G.* Immobilization of Acidithiobacillus ferrooxidans-1333 on the waste ore particles for the continuous oxidation of ferrous iron // *Iranian Journal of Biotechnology*. – 2020. – V. 18 (3). – P. 55–61.
20. *Yin S., Wang L., Chen X., Yan R., Wu A., Kabwe E., An K., Zhang L.* Copper Bioleaching in China: Review and Prospect // *Minerals*. – 2018. – V. 8, № 2. – P. 32.
21. *Zhou Z., Ma W., Liu Y., Ge S., Hu S., Zhang R., Ma Y., Du K., Syed A., Chen P.* Potential application of a knowledgebase of iron metabolism of Acidithiobacillus ferrooxidans as an alternative platform // *Electronic Journal of Biotechnology*. – 2021. – 52. – P. 45–51.
22. *Dresher W. H.* Producing Copper Nature's Way: Bioleaching. Innovations [Электронный ресурс]. – URL: https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2004/05/producing_copper_natures_way_bioleaching.html (дата обращения 17.11.2022)

REFERENCES

1. *Abubakriyev A. T., Magad Ye., Ignat'yev M. M., Koyzhanova A. K., Yesimova D. M.* Otrabotka optimal'nykh parametrov i rezhimov vyshchelachivaniya med'soderzhashchikh rud Bayskogo mestorozhdeniya [Development of optimal parameters and modes of leaching of copper-bearing ores of the Baiskoye deposit]. Resurso-sberegayushchiye tekhnologii v obogashchenii rud i metallurgii tsvetnykh metallov: materialy Mezhdunarodnoy konferentsii, Arko publ., 2015, pp. 172–175. (In Russ.)
2. *Bakayeva M. D., Stolyarova Ye. A., Loginov O. N.* Izvlecheniye metallov iz otvalov Mednogorskogo mednosernogo kombinata s pomoshch'yu biotekhnologii [Extraction of metals from the dumps of the Mednogorsk copper-sulfur plant using biotechnology]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Orenburg State University], 2009, No. 10, pp. 533–535. (In Russ.)
3. *Beyssembayev B. B., Kenzhaliyev B. K.* Teoriya i praktika ispol'zovaniya metodov geotekhnologii dlya pererabotki zabalansovykh i nekonditsionnykh mednykh rud [Theory and practice of using geotechnology methods for processing out-of-balance and sub-standard copper ores]. Kompleksnoye ispol'zovaniye mineral'nogo syr'ya [Complex use of mineral raw materials], 1999, No. 4, pp. 93–98. (In Russ.)
4. *Vodolazov L. I., Drobadenko V. P., Lobanov D. P., Malukhin N. G.* Geotekhnologiya. Kuchnoye vyshchelachivaniye bednogo mineral'nogo syr'ya [Geotechnology. Heap leaching of poor minerals]. Moscow, MGGA publ., 2000, 300 p. (In Russ.)
5. *Giganov G. P., Yarinova. T. I.* Ispol'zovaniye ekstraktsii v gidrometallurgii medi za rubezhom [The use of extraction in copper hydrometallurgy abroad]. Tsvetnaya metallurgiya [Non-ferrous metallurgy], 1998, No. 6, pp. 45–47. (In Russ.)
6. *Zayavka 5207996 SSHA, MKI C01G 3/00.* Kislotoynoye kuchnoye vyshchelachivaniye mednykh rud s dobavkoy ftoralifaticheskikh poverkhnostnoaktivnykh veshchestv [Application 5207996 USA, MKI C01G 3/00. Acid heap leaching of copper ores with the addition of fluoroaliphatic surfactants]. Zayavitel' [Applicant] Minnesota Mining and Manufacturing Company, zayavl. 10.10.91; opubl. 15.01.95.
7. *Ignat'yev M. M.* Razrabotka ekstraktsionnoy tekhnologii polucheniya medi iz rastvorov vyshchelachivaniya rud mestorozhdeniya Aktogay [Development of extraction technology for obtaining copper from leaching solutions of ores from the Aktogay deposit], dissertatsiya na soiskaniye uchebnoy stepeni kand. tekhn. Nauk [dissertation for the degree of Cand. tech. Sciences]. Alma-Ata, 1989, 173 p. (In Russ.)
8. *Patent na izobreteniyе KZ No. 32300.* Sposob izvlecheniya medi iz tekhnogennykh produktov [Patent for invention KZ No. 32300. Method for extracting copper from technogenic products]. Abisheva Z. S., Ignat'yev M. M., Kuanbay A., Koyzhanova A. K., Arystanova G. A., Magomedov D. R., zayavl. 09.02.2016, opubl. 15.08.2017, bulletin 15.
9. *Sanakulov K. S.* Perspektivy pererabotki oksilennykh mednykh rud mestorozhdeniya Kal'makyr [Prospects for processing oxidized copper ores at the Kalmakyr deposit]. Gornyy vestnik Uzbekistana, 2009, No. 3, pp. 47–49. (In Russ.)
10. *Khalezov B. D.* Issledovaniya i razrabotka tekhnologii kuchnogo vyshchelachivaniya mednykh i medno-tsinkovykh rud [Research and development of technology for heap leaching of copper and copper-zinc ores].

- Yekaterinburg, "Institut metallurgii Ural'skogo otdeleniya RAN" publ., 2008, 548 p. (In Russ.)
11. *Gentina J. C., Acevedo F.* Application of bioleaching to copper mining in Chile. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2013, V. 16, No. 3. DOI: 10.2225/voL16-issue3-fuLLtext-12.
 12. *Hayes A.* Top of the heap. *Mining Magazine*, June 2011, pp. 62–68.
 13. *Koizhanova A. K., Magomedov D. R., Tastanov E. A., Kenzhaliyev B. K., Sedelnikova G. V., Berkinbayeva A. N.* Intensification of copper leaching from heaps using biological oxidation. *Metalurgija*, 2022, V. 61, No. 3–4, pp. 789–792.
 14. *Lin M., Yang B., Lin H., Liu S., Wang J.* Catalytic Effects of Red Mud and *Acidithiobacillus ferrooxidans* on Bio-dissolution of Pyrite. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, V. 768 (1), 012019.
 15. *Lyu X., Zhao H., Zhang Y., Yan Z., Zhao Y., Zheng H., Liu W., Xie J., Qiu G.* Active destruction of pyrite passivation by ozone oxidation of a biotic leaching system. *Chemosphere*, 2021, V. 277, 130335.
 16. *Magomedov D. R., Magad E., Ignatiev M. M., Koizhanova A. K., Zhanabay Zh.* Extraction of copper and precious metals from waste copper dumps of the Sayak deposit. *Complex Use of Mineral Resources*, 2016, No. 4, pp. 30–34.
 17. *Mukhanova A., Tussupbayev N., Turysbekov D., Yessengaziyev A.* Improvement of the selection technology of copper-molybdenum concentrate with the use of modified flotoragents. *Metalurgija*, 2022, V. 61, No. 1, pp. 221–224.
 18. *Santaolalla A., Gutierrez J., Gallastegui G., Barona A., Rojo N.* Immobilization of *Acidithiobacillus ferrooxidans* in bacterial cellulose for a more sustainable bioleaching process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, V. 9 No. 4, 105283.
 19. *Song C.-I., Jo C.-M., Ri H.-G.* Immobilization of *Acidithiobacillus ferrooxidans*-1333 on the waste ore particles for the continuous oxidation of ferrous iron. *Iranian Journal of Biotechnology*, 2020, V. 18 (3), pp. 55–61.
 20. *Yin S., Wang L., Chen X., Yan R., Wu A., Kabwe E., An K., Zhang L.* Copper Bioleaching in China: Review and Prospect. *Minerals*, 2018, V 8, No. 2, pp. 32.
 21. *Zhou Z., Ma W., Liu Y., Ge S., Hu S., Zhang R., Ma Y., Du K., Syed A., Chen P.* Potential application of a knowledgebase of iron metabolism of *Acidithiobacillus ferrooxidans* as an alternative platform. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2021, 52, pp. 45–51.
 22. *Dresher W. H.* Producing Copper Nature's Way: Bioleaching. *Innovations* available at: https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2004/05/producing_copper_natures_way_bioleaching.html (17.11.2022)

Статья поступила в редакцию 20.07.22; одобрена после рецензирования 20.10.22; принята к публикации 21.10.22.
The article was submitted 20.07.22; approved after reviewing 20.10.22; accepted for publication 21.10.22.