

К ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ СУЛЬФИДНЫХ РУД

И.А. Панфилов^{1,2,3}, Н.А. Шепета^{1,2}, А.А. Ступина^{1,2,4}, А.А. Бойко^{1,2,3}, В.В. Кондратьев⁵

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий
им. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия, e-mail: crook_80@mail.ru

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

⁴ Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

⁵ Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Процессы извлечения металлов совершенствуются путем повышения активности вступающих в реакции веществ. Глубокая переработка отходов обогащения руд осуществляется путем радикального изменения их свойств на молекулярном уровне. Среди методов активизации процессов переработки руд перспективен метод электрохимического извлечения золота. Исследование эффективности электрохимического метода включает в себя эксперимент, систематизацию переменных факторов, регрессионный анализ показателей, графическую интерпретацию и инженерное прогнозирование. Критерием эффективности комбинирования методов обогащения является повышение извлечения металлов. По результатам исследования поведения сульфидов ранжирован окислительно-восстановительный потенциал реагентов, определены влияющие на процесс факторы и доля извлечения золота в зависимости от них, построены графики зависимости извлечения металлов от продолжительности процесса и установлен характер зависимости перенапряжения от плотности тока для электролизеров с диафрагмой или мембраной. Доказано, что электрохимическое хлорное окисление руд в суспензии и пульпе ускоряет процесс разложения минералов и обеспечивает комплексный эколого-экономический эффект, а установленные закономерности получения золота несут универсальный характер. Актуальность исследования обусловлена необходимостью вовлечения в производство запасов, некондиционных для традиционного обогащения упорных сульфидных руд. Материалы статьи представляют практическую ценность для горных предприятий, добывающих, в первую очередь, золото, а также прочие металлы.

Ключевые слова: золото, упорные сульфидные руды, извлечение, электрохимическое извлечение, инновации, окисление руд, промышленность и инновации, эффективность использования ресурсов, промышленное развитие, инновационные процессы.

Для цитирования: Панфилов И. А., Шепета Н. А., Ступина А. А., Бойко А. А., Кондратьев В. В. К электрохимической технологии извлечения золота из сульфидных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 226–238. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_226.

The electrochemical technology of gold extraction from sulfide ores

I.A. Panfilov^{1,2,3}, N.A. Shepeta^{1,2}, A.A. Stupina^{1,2,4}, A.A. Boyko^{1,2,3}, V.V. Kondratiev⁵

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russia, e-mail: crook_80@mail.ru

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

⁴ Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service of Ministry
of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, Russia

⁵ A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract: The article is aimed at identifying patterns of behavior of minerals under the influence of the influence exerted on them. The results of an experiment on the tailings of gold ore enrichment are presented. Metal extraction processes are improved by increasing the activity of reacting substances. Deep processing of ore processing waste is carried out by radically changing their properties at the molecular level. Among the methods of activating ore processing processes, the method of electrochemical gold extraction is promising. The study of the effectiveness of the electrochemical method includes experiment, systematization of variable factors, regression analysis of indicators, graphical interpretation and engineering forecasting. The criterion for the effectiveness of combining enrichment methods is to increase the extraction of metals. According to the results of the study of the behavior of sulfides, the redox potential of the reagents was ranked, the factors influencing the process and the proportion of gold extraction depending on them were determined, graphs of the dependence of metal extraction were constructed and the nature of the dependence of overvoltage on current density was established differentially for electrolyzers: with a diaphragm or membrane. It is proved that electrochemical chlorine oxidation of ores in suspension and pulp accelerates the process of decomposition of minerals and provides a comprehensive ecological and economic effect, and the obtained patterns of gold production are universal. The relevance of the study is due to the need to involve in the production of stocks of substandard for traditional enrichment of persistent sulfide ores. The materials of the article are of practical value for mining enterprises, first of all, mining gold, and then for mining other metals.

Key words: gold, refractory sulfide ores, extraction, electrochemical extraction, Innovation, ore oxidation, industrial and innovation, global resource efficiency, industrial development, innovation processes.

For citation: Panfilov I. A., Shepeta N. A., Stupina A. A., Boyko A. A., Kondratiev V. V. The electrochemical technology of gold extraction from sulfide ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11-1):226-238. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_226.

Введение

При выборочной отработке месторождений руд цветных металлов запасы обедняются с переводом в категорию неактивных [1–3]. Если на первой стадии существования предприятия это позволяет окупить расходы за счет добываемо-

го металла, то на последующих стадиях приходится добывать менее богатые металлом руды в нарушенных породах с разубоживанием, что увеличивает выход хвостов при обогащении [4–7]. К категории упорных относятся руды и концентраты, переработка которых традици-

онным способом не обеспечивает требуемого извлечения золота. Повышенное внимание к проблеме переработки упорных золотосодержащих руд является следствием:

- повышения рыночной цены на золото;
- уменьшения запасов с легко извлекаемым золотом;
- уменьшения содержания золота в рудах;
- накапливания отвалов хвостов обогащения упорных руд.

Причиной упорности является тонкая вкрапленность золота в сульфидных и силикатных минералах и сорбционная активность природных веществ. Упорность представляет проблему при вскрытии рудного материала.

В перспективе можно ожидать увеличения количества хвостов обогащения таких руд вследствие исчерпания запасов доступных для разработки месторождений [1–3]. Становится актуальной проблема утилизации отходов добычи и переработки руд [4–6]. Уровень потерь золота при добыче и обогащении оценивают от 10 до более 30 %. Количество техногенного золота достигает 2 тыс. т при учтенных в России на данный момент 7 тыс. т балансовых запасов [7, 8]. Отходы обогащения железистых кварцитов содержат 0,5–0,6 г/т золота [9]. Наличие золота характерно и для месторождений углей.

В процессе накопления хвостов в хвостохранилищах формируются техногенные месторождения золота. Высокоминерализованная водная среда преобразует хвосты, результатом чего является разрушение золотосодержащих минералов и высвобождение золота. Преобразование хвостов приводит к перераспределению золота из рассеянного состояния в обогащенные металлом слои [10, 11].

Особенности локализации месторождений золота обуславливают поиски но-

вых технологий с использованием физико-химических эффектов при активации процессов обогащения руд [12–15].

Традиционные методы обогащения желаемого извлечения не обеспечивают, что объясняется трудностью оптимизации режимов извлечения золота по крупности, плотности и т.д. [16–19] и приводит к накоплению запасов упорных руд в хвостохранилищах.

Необходимость обеспечения запасов промышленности и исчерпание легкодоступных источников минерального сырья становятся источниками проблемы извлечения металлов из хвостов переработки руд цветных и благородных металлов [20–23].

В соответствии с существующими представлениями физико-механические процессы в рамках обогатительного передела активируются воздействием энергетических потоков. Одним из перспективных направлений является метод электрохимического извлечения золота [24–27].

Электрохимические процессы основаны на явлении электролиза растворов и расплавленных сред.

Основными способами глубокого обогащения хвостов обогащения являются гравитация и флотация. Другие методы, например, фото- и радиометрической сепарации при обогащении хвостов флотации не всегда успешны [28].

Наиболее простые гравитационные методы в ряде случаев позволяют повысить извлечение золота. Возможности гравитационного обогащения зависят от морфометрических параметров золота и характера его минеральных связей. Обогащение сырья с тонким золотом в сростках обеспечивает извлечение до 70% золота.

В ряде случаев гравитационные методы оказываются перспективными для извлечения тонкого золота с помощью центробежных концентраторов и кон-

центрационных столов [29–31], но в основном этот метод применим только в сочетании с флотацией и гидрометаллургией.

Флотационные и гравитационно-флотационные технологии наиболее распространены при обогащении руд цветных и благородных металлов.

При флотации сульфидных руд извлечение золота не превышает 70%. Если методы механической [32–34] и химической активации [35–37] можно считать относительно хорошо освоенными, то методы электрохимической активации исследованы в меньшей мере.

Целью настоящей статьи является обоснование возможности извлечения металлов из неиспользуемых и химически агрессивных хвостов обогащения, что открывает возможности вовлечения в производство запасов ценного и неиспользуемого сырья.

Материалы исследования

Извлечение золота из руд осуществляется после деструкции минералов при разложении в присутствии сильного окислителя с активацией процесса электрохимическим воздействием в три этапа [38, 39]:

- деструкция сульфидных минералов;
- разложение сульфидных минералов в кислой среде в процессе электролиза;
- окислительно-восстановительные реакции с осаждением золота на пиритном аноде.

Полнота извлечения золота определена методом регрессионного анализа в среде Maple с построением графиков зависимости извлечения золота от продолжительности процесса.

Зависимость параметров электролиза от продолжительности реакции находится решением дифференциального уравнения по времени электролиза.

Эффективность извлечения золота зависит от ассоциации золота с пиритом и арсенопиритом, размеров зерен пирита и арсенопирита, параметров электрического воздействия, электропроводности раствора, pH, Eh и температуры [40, 41].

По результатам извлечения золота из сульфидных руд устанавливаются зависимости, детализирующие представления о переработке техногенного сырья. Результаты исследований используются для обоснования конверсии производства на электрохимическую технологию извлечения металла.

Анализом результатов переработки золотосодержащих упорных сульфидных руд устанавливаются и систематизируются влияющие на процесс обогащения факторы.

На основании результатов исследования осуществляется инженерное прогнозирование параметров извлечения металлов.

Результаты

Золото из сульфидных руд извлекают после деструкции минералов в присутствии сильного окислителя.

Эффективность процесса определяется окислительным потенциалом среды, который обеспечивает возможность перехода электронов от донора, которым служит сера, к акцептору — атому окислителю.

Переработка руд в суспензии и пульпе ускоряет процесс разложения минералов в сравнении с обработкой в виде анодных блоков.

Результаты извлечения золота из упорных сульфидных руд в ходе электролиза сведены в табл. 1.

Методами регрессионного анализа в среде Maple определена доля извлечения золота:

$$y = -0,4t + 1,22t^2 - 0,4t^3. \quad (1)$$

Графическое изображение зависимости извлечения золота от продолжи-

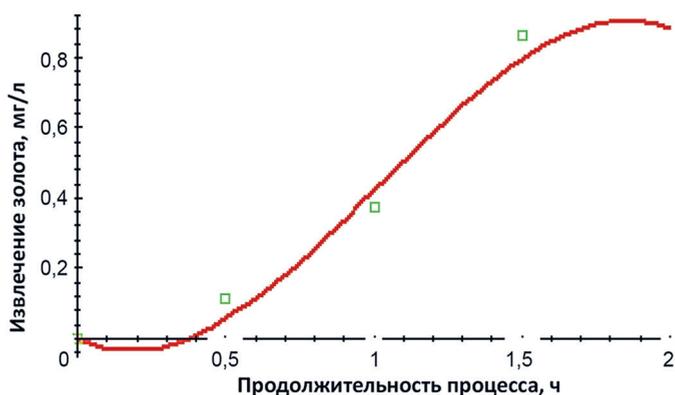


Рис. 1. Зависимость извлечения золота от продолжительности процесса

Fig. 1. Dependence of gold recovery on the duration of the process

Таблица 1

Показатели извлечения золота электрохимическим методом
Indicators of gold recovery by electrochemical method

Время, ч	Извлечено в раствор			Потери, %	Осаждено на катоде		Потери при переработке		Извлечено, %
	мг/л	мг	%		мг	%	мг/л	мг	
0,5	0,35	18,3	12,9	87,1	15,9	12,3	0,03	2,2	11,4
1,0	0,76	39,5	28,1	5,9	36,0	27,9	0,06	3,3	25,7
1,5	1,18	71,6	51,1	8	69,1	53,6	0,04	2,5	49,3
Всего	2,20	129	92,1	8	121	93,7	0,13	8	86,4

тельности процесса извлечения дано на рис. 1.

При восстановлении частиц золота в сульфидных растворах наблюдается основная волна. Разделение волны в сульфидных растворах наблюдается в более широкой области (рН 0–7), чем в хлоридных и перхлоратных растворах (рН 2–3,5).

Доля извлечения в раствор при дезинтегрировании пульпы:

$$y_1 = -0,39t + 1,29t^2 - 0,43t^3. \quad (2)$$

График зависимости извлечения при дезинтегрировании пульпы от времени показан на рис. 2.

Из рисунков следует, что доля извлечения в раствор при дезинтегрировании пульпы подобна доле извлечения золота.

Атомарный хлор в зоне анода вступает в реакцию с сульфидами, которые

окисляются и образуют серную кислоту с рН 2,0–4,0. Часть хлора, выделяющегося из пульпы, не успевает прореагировать с сульфидами.

При высокой плотности тока хлорид натрия разлагается с выделением газообразного молекулярного хлора и образованием едкого натра:



Нормальный окислительно-восстановительный потенциал составляет +1000 МВ, поэтому при Eh > 1000 МВ и создаются условия для перехода золота в раствор.

Приоритетную роль в разложении сульфидных минералов играет атомарный хлор, обладающий более сильным окислительным потенциалом, чем кислород и молекулярный хлор.

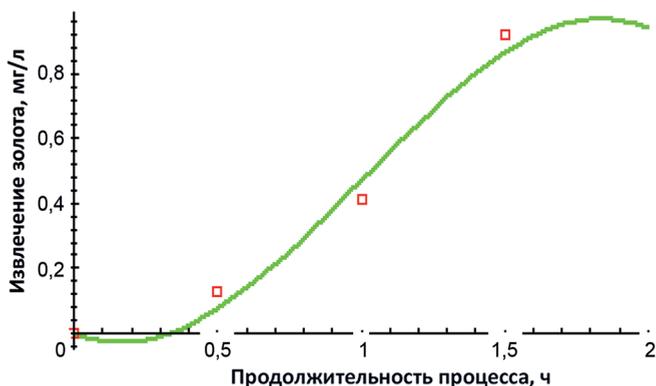


Рис. 2. График зависимости извлечения в раствор при дезинтегрировании пульпы от продолжительности эксперимента

Fig. 2. Graph of the dependence of extraction into solution during pulp disintegration on the duration of the experiment

Выход по току разложения сульфидов:

$$\eta = \zeta_{\phi} / 1,32Jt, \quad (4)$$

где η – выход по току; J – количество хлора, израсходованное на разложение сульфидов; 1,32 – электрохимический эквивалент хлора.

Напряжение электролиза складывается из падения напряжений на участках цепи:

$$V = E_p \Psi_a + \Psi_k + V_{эл} + \Sigma V_c, \quad (5)$$

где E_p – напряжение разложения раствора NaCl; Ψ_a и Ψ_k – перенапряжение на аноде и катоде; ΔV_c – потеря напря-

жения на контактах и проводниках первого рода.

При выделении водорода напряжение с повышением температуры на 1° снижается на 2–3 МВ. При выделении хлора на графитовых анодах перенапряжение в 5 раз ниже перенапряжения в процессе выделения кислорода при плотности тока 1000 А/м^2 .

Падение напряжения в электролите:

$$V_{эл} = \frac{A_{ср}}{\gamma} K \Delta L, \quad (6)$$

где $A_{ср}$ – плотность тока в межэлектродном пространстве; γ – электропровод-

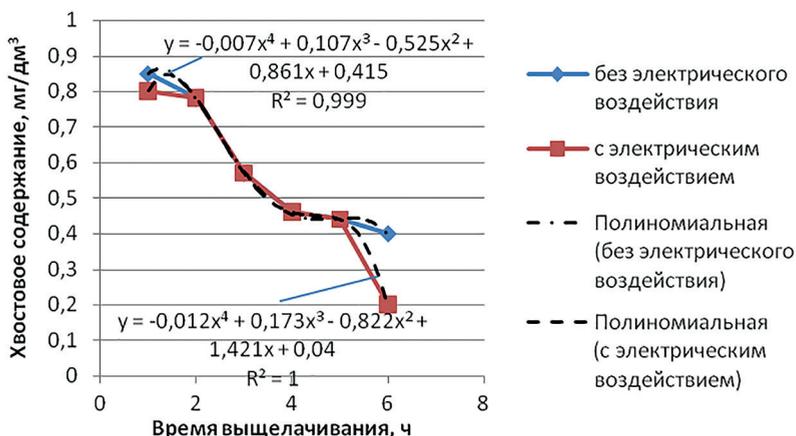


Рис. 3. Зависимость извлечения золота от времени выщелачивания и содержания металлов

Fig. 3. Dependence of gold recovery on leaching time and metal grade

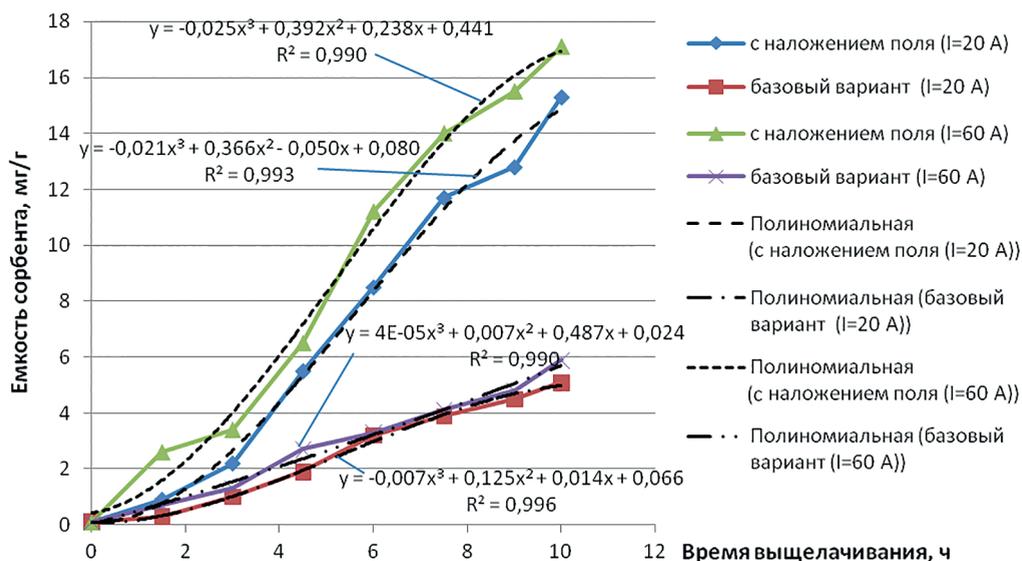


Рис. 4. Зависимость емкости сорбента от параметров выщелачивания
 Fig. 4. Dependence of sorbent capacity on leaching parameters

ность электролита; ΔL — расстояние между электродами; K — коэффициент, учитывающий наполнение электролита газом.

Зависимость тока электролиза от продолжительности реакции находится решением уравнения:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{A_{cp}}{\gamma} K \cdot t\right), \quad (7)$$

где сила тока в начальный момент электролиза.

Время выщелачивания и содержание металлов при выщелачивании без электрического воздействия и с электрическим воздействием связаны зависимостью (см. рис. 3).

Кинетические кривые процесса обнаруживают хорошую сходимость (рис. 4).

Обсуждение

Золото может быть извлечено из раствора по схеме, представленной на рис. 5.

На стадии подготовки руд и хвостов переработки к выщелачиванию может быть использована скоростная мельница — дезинтегратор, обеспечивающая

перевод в жидкую фазу всех содержащихся в минерале металлов при создании соответствующих условий (рис. 6).

Показателями электрохимической технологии являются: напряжение электролиза, выход по току для разложения сульфидов и выход по энергии.

Повышение плотности тока увеличивает анодный потенциал, но увеличивает и расход энергии. Оптимальное значение плотности тока 800...1000 А на 1 м² площади анода.

Оптимальное значение температуры растворения сульфидов 60...800 °С. Уменьшение температуры замедляет процесс выделения хлора, а увеличение уменьшает выход продуктов.

При равных условиях скорость электрохимической реакции зависит от концентрации раствора, температуры и активности перемешивания.

Себестоимость добычи золота сравнима с себестоимостью его добычи из окисленных руд кучным выщелачиванием.

Исследованием электрохимического метода извлечения золота из сульфидных

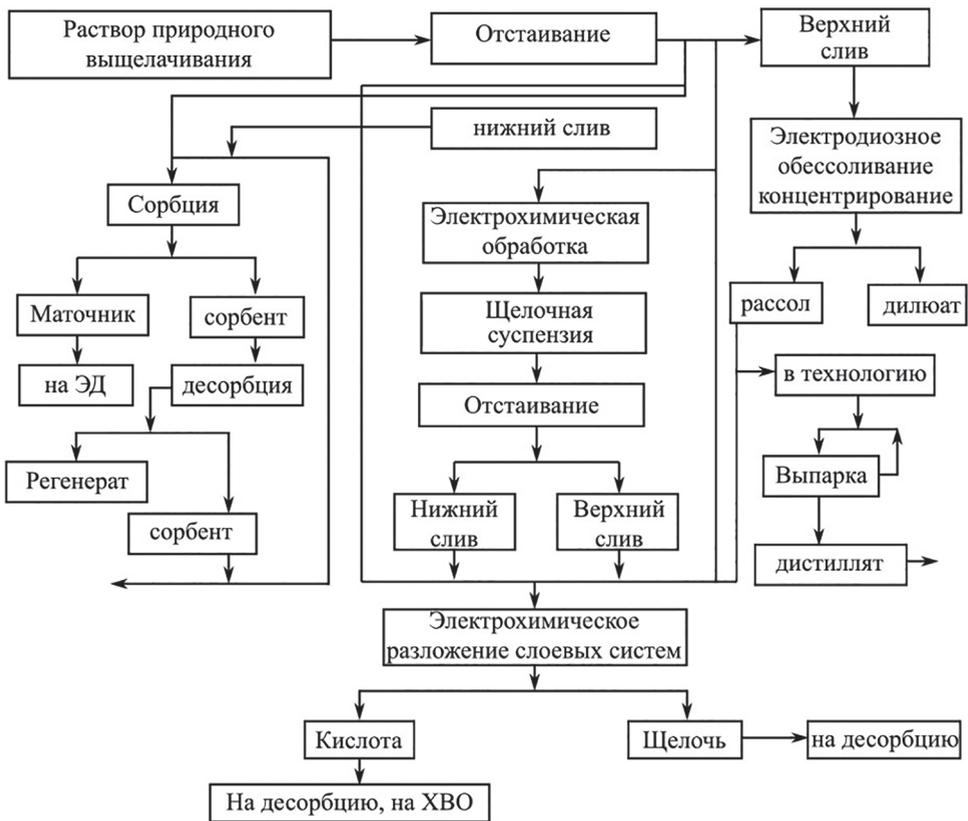


Рис. 5. Схема электрохимического извлечения металлов из раствора
 Fig. 5. Scheme of electrochemical extraction of metals from solution

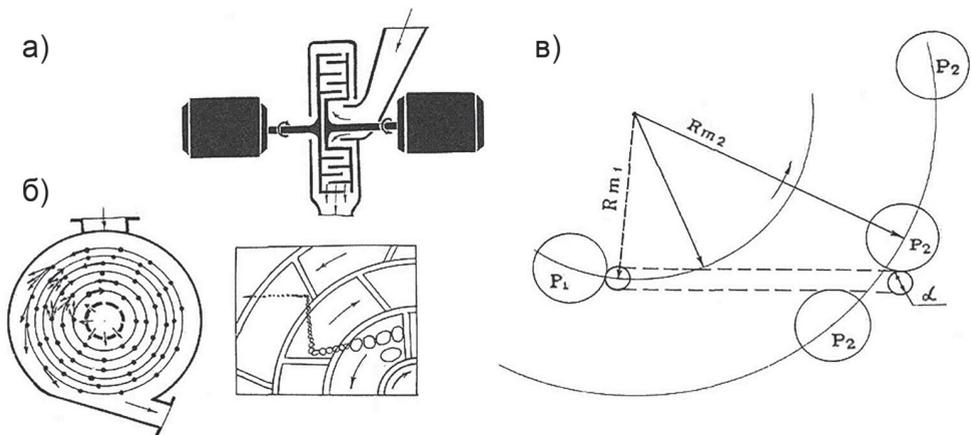


Рис. 6. Схема и принцип работы дезинтегратора: схема (а); движение частиц (б); дезориентация частиц: P_1, P_2 — расстояния между билами круга; R_{m1}, R_{m2} — радиусы круга бил; α — размер частиц минерала (в)

Fig. 6. Scheme and principle of operation of disintegrator: scheme (a); movement of particles (b); disorientation of particles: P_1, P_2 — distances between the beaters of circle; R_{m1}, R_{m2} — beater circle radii; α — particle size of mineral (v)

руд получены зависимости, помогающие детализировать представления о технологиях их переработки [34] и обосновывать возможность конверсии производства золота на электрохимическую технологию.

Электрохимическое хлорное окисление руд ускоряет процесс разложения сульфидных минералов и является обоснованием целесообразности новой технологии извлечения золота.

При обеспечении рекомендуемых параметров процесса электрохимического разложения сульфидов электрохимический метод обеспечивает эколого-экономический эффект.

Использование электрохимического метода извлечения золота из сульфидных руд позволяет резко уменьшить объем

хранения токсичных хвостов обогащения. Результаты исследования согласуются с данными специалистов рассматриваемого направления горного дела [35–37].

Выводы

Электрохимическое хлорное окисление руд по сравнению с обработкой в виде анодных блоков ускоряет процесс извлечения золота. Параметры реализации процесса электрохимического разложения сульфидов определяются дифференцированно для конкретных условий.

Использование электрохимического метода обеспечивает комплексный эколого-экономический эффект, учитывая утилизацию опасных при хранении хвостов обогащения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Литературу с п. 1 по п. 12 смотри в REFERENCES.

13. Абдыкирова Г. Ж., Бектурганов Н. С., Дюсенова С. Б., Танекеева М. Ш., Сукуров Б. М. Исследование возможности извлечения золота из лежалых хвостов золотоизвлекательной фабрики // Обогащение руд. — 2015. — № 3. — С. 46–50. DOI: 10.17580/or.2015.03.08.

14. Adigamov R. R., Baraboshkin K. A., Mishnev P. A. Development of rolling procedures for pipes of K55 strength class at the laboratorial mill // CIS Iron and Steel Review. 2022, vol. 24, pp. 60–66. DOI: 10.17580/cisirs.2022.02.09.

15. Чжо З. Я., Хтет З. У., Пье Ч. Ч., Вай З. Ч. Оптимизация технологической схемы обогащения золотосульфидных руд «двойной упорности» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 9. — С. 143–155. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_143.

16. Герасименко Т. Е., Рубаева И. О., Максимов Р. Н., Васильев В. В. Особенности взаимодействия полидисперсных частиц в процессах флотации микродисперсий золота // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 97–113. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-97-113.

17. Евдокимов С. И., Макоева А. К., Максимов Р. Н., Дятлова Д. И. Разработка метода и прибора для измерения сил в контактах частиц в условиях флотации микродисперсий золота // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 81–96. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-81-96.

Литературу с п. 18 по п. 27 смотри в REFERENCES.

28. Хуснутдинов В. Р., Логинов А. В., Апарнев А. И., Уваров Н. Ф. Механохимический синтез двойных гидроксидов олова и щелочно-земельных металлов // Химия в интересах устойчивого развития. — 2018. — Т. 26. — № 5. — С. 557–560. DOI: 10.15372/KhUR20180516.

29. Al-Joubori A. A., Suryanarayana C. Synthesis of austenitic stainless steel powder alloys by mechanical alloying // Journal of Materials Science. 2017, vol. 52, no. 20, pp. 11919–11932. DOI: 10.1007/s10853-017-0963-3.

30. Gozbenko V. E., Khomenko A. P., Kargapol'tsev S. K., Minaev N. V. Creating of the alternative lubricants and practice of their use // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12369 – 12372.

31. Овчаренко Е. В., Молчанова Т. В., Смирнов К. М., Крылова О. К. Извлечение золота из бедных растворов и очистка продуктов кучного выщелачивания от ртути // *Цветные металлы*. – 2019. – № 8. – С. 56 – 60. DOI: 10.17580/tsm.2019.07.06.

32. Li G., Zhou Q., Zhu Z., Luo J., Rao M., Peng Z., Jiang T. Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 189, pp. 620 – 626. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.083.

33. MacCarthy J., Nosrati A., Skinner W., Addai-Mensah J. Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore // *Hydrometallurgy*. 2016, vol. 160, pp. 26 – 37. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.11.004.

34. Balanovsky A. E., Shtayger M. G. Plasma-arc surface modification of metals in a liquid medium // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 411, no. 1, article 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012013.

35. Kondrtiev V. V., Govorkov A. S., Kolosov A. D., Gorovoy V. O., Karlina A. I. The development of a test stand for developing technological operation «flotation and separation of MD2. The deposition of nanostructures MD1» produce nanostructures with desired properties // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12373 – 12377.

36. Алексеев В. С., Банщикова Т. С. Извлечение упорных форм золота из гравитационных концентратов и хвостов обогащения россыпей с применением химических реагентов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2017. – № 4. – С. 159 – 164.

Литературу с п. 37 по п. 40 смотри в REFERENCES.

41. Шеметов П. А., Глотов Г. Н. Теоретические основы автоматизированных систем геотехнологии подземного выщелачивания урана // *Горный журнал*. – 2011. – № 11. – С. 35 – 40. **ПАБ**

REFERENCES

1. Golik V. I., Razorenov Y. I., Polukhin O. N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015, vol. 10, no. 17, pp. 38105 – 38109.

2. Gladkih A. M., Konyuhov V. Yu., Galyautdinov I. I., Shchadova E. I. Green building as a tool of energy saving. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 350, no. 1, article 012032. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012032.

3. Suslov K. V., Stepanov V. S., Solonina N. N. Smart grid: Effect of high harmonics on electricity consumers in distribution networks. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2013, pp. 841 – 845. 6653416.

4. Jang H., Topal E., Kawamura Y. Decision support system of unplanned dilution and ore-loss in underground stoping operations using a neuro-fuzzy system. *Applied Soft Computing Journal*. 2015, vol. 32, pp. 1 – 12. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.03.043.

5. Jarvie-Eggart M. E. Responsible mining: Case studies in managing. *Social & Environmental Risks in the Developed World*. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.

6. Rezanov V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Grinek A. V., Skee-ba V. Y., Lyosin A. V. Study of melting methods by electric resistance welding of rails. *Metals*. 2022, vol. 12, no. 12, article 2135. DOI: 10.3390/met12122135.

7. Wang G., Li R., Carranza E. J. M., Yang F. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China. *Ore Geology Reviews*. 2015, vol. 71, pp. 592 – 610. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.03.002.

8. Konyuhov V. Yu., Gladkih A. M., Galyautdinov I. I., Kiseleva T. Yu. Ecological architecture: The green roofs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 350, no. 1, article 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012035.

9. Doifode S. K., Matani A. G. Effective industrial waste utilization technologies towards cleaner environment. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. 2015, vol. 4. Special Iss. NCSC, pp. 536 – 540. DOI: 10.17485/ijst/2017/v10i28/116237.

10. Vrancken C., Longhurst P. J., Wagland S. T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017, vol. 61, pp. 40 – 57. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.019.

11. Isametova M. E., Karlina Y. I., Kononenko R. V., Skeebe V. Y., Absadykov B. N. Thermal pulse processing of blanks of small-sized parts made of beryllium bronze and 29 NK alloy. *Materials*. 2022, vol. 15, no. 19, article 6682. DOI: 10.3390/ma15196682.

12. Malatse M., Ndlovu S. The viability of using the Witwatersrand gold mine tailings for brickmaking. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015, vol. 115, pp. 321 – 327. DOI: 10.17159/2411-9717/2015/v115n4a8.

13. Abdykirova G. Zh., Bekturganov N. S., Dyusenova S. B., M. Sh. Study of the possibility of extracting gold from stale tailings of a gold recovery plant. *Obogashchenie Rud*. 2015, no. 3, pp. 46 – 50. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2015.03.08.

14. Adigamov R. R., Baraboshkin K. A., Mishnev P. A. Development of rolling procedures for pipes of K55 strength class at the laboratorial mill. *CIS Iron and Steel Review*. 2022, vol. 24, pp. 60 – 66. DOI: 10.17580/cisistr.2022.02.09.

15. Kyaw Z. Y., Htet Z. O., Phyo K. K., Wai Z. K. Optimization of processing flow charts for double refractory sulfide gold ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 9, pp. 143 – 155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_143.

16. Gerasimenko T. E., Rubayeva I. O., Maksimov R. N., Vasiliev V. V. Peculiarities of poly disperse particle interaction in gold micro dispersions flotation processes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 97 – 113. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-97-113.

17. Evdokimov S. I., Makoeva A. K., Maksimov R. N., Dyatlova D. I. Development of a method and apparatus for measuring the forces in particle contacts under conditions of flotation of gold microdispersions. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 81 – 96. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-81-96.

18. Konyuhov V. Yu., Gladkih A. M., Chemezov A. V. Evaluation of the economic feasibility of the introduction of plasma hardening technologies in the Far North enterprises. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 560, no. 1, article 012147 DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012147.

19. Shutaleva A., Nikonova Z., Savchenko I., Abramova S., Lubimova V., Novgorodtseva A. Environmental behavior of youth and sustainable development. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 1, article 250. DOI: 10.3390/su14010250.

20. Ershov V. A., Kondratiev V. V., Karlina A. I., Kolosov A. D., Sysoev I. A. Selection of control system parameters for production of nanostructures concentrates. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1118, no. 1, article 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012014.

21. Ilyushin P., Kulikov A., Suslov K., Filippov S. Consideration of distinguishing design features of gas-turbine and gas-reciprocating units in design of emergency control systems. *Machines*. 2021, vol. 9, no. 3, pp. 1 – 18, 47. DOI: 10.3390/machines9030047.

22. Smirnov E., Dvoryatkina S., Shcherbatykh S. Software package to support students' research activities in the hybrid intellectual environment of mathematics teaching. *Mathematics*. 2023, vol. 11, no. 4, article 952. DOI: 10.3390/math11040952.

23. Qi C.-C., Hua Y.-X., Chen K.-H., Jie Y.-F., Zhou Z.-R., Ru J.-J., Xiong L., Gong K. Preparation of ferrotitanium alloy from ilmenite by electrochemical reduction in chloride molten salts. *JOM*. 2016, vol. 68, no. 2, pp. 668 – 674. DOI: 10.1007/s11837-015-1710-3.

24. Jing Xiang, Shouxu Wang, Ling Li. Electrochemical factors of levelers on plating uniformity of trough-holes: simulation and experimentes. *Journal of the Electrochemical Society*. 2018, vol. 165, no. 9, pp. 359 – 365. DOI: 10.1149/2.0331809jes.
25. Ivashutenko A., Vidayev I., Kostikov K. Influence of technological factors on structure and properties of alumina-zirconia ceramics. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1040, 845-849. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.845.
26. Bosikov I. I., Martynushev N. V., Klyuev R. V., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Eremeeva S. V. Complex Assessment of x-ray diffraction in crystals with face-centered silicon carbide lattice. *Crystals*. 2023, vol. 13, no. 3, article 528 p. oi: 10.3390/cryst13030528.
27. Kondratiev V. V., Nebogin S. A., Sysoev I. A., Gorovoy V. O. Description of the test stand for developing of technological operation of nano-dispersed dust preliminary coagulation. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12809 – 12813.
28. Khusnutdinov V. R., Loginov A. V., Aparnev A. I., Uvarov N. F. Mechanochemical synthesis of double hydroxides of tin and alkaline earth metals. *Chemistry for sustainable development*. 2018, vol. 26, no. 5, pp. 557 – 560. [In Russ]. [In Russ]. DOI: 10.15372/KhUR20180516.
29. Al-Joubori A. A., Suryanarayana C. Synthesis of austenitic stainless steel powder alloys by mechanical alloying. *Journal of Materials Science*. 2017, vol. 52, no. 20, pp. 11919 – 11932. DOI: 10.1007/s10853-017-0963-3.
30. Gozbenko V. E., Khomenko A. P., Kargapoltsev S. K., Minaev N. V. Creating of the alternative lubricants and practice of their use. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12369 – 12372.
31. Овчаренко Е. В., Молчанова Т. В., Смирнов К. М., Крылова О. К. Извлечение золота из бедных растворов и очистка продуктов кучного выщелачивания от ртути. *Tsvetnye Metallurgy*. 2019, no. 8, pp. 56 – 60. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2019.07.06.
32. Li G., Zhou Q., Zhu Z., Luo J., Rao M., Peng Z., Jiang T. Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 189, pp. 620 – 626. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.083.
33. MacCarthy J., Nosrati A., Skinner W., Addai-Mensah J. Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore. *Hydrometallurgy*. 2016, vol. 160, pp. 26 – 37. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.11.004.
34. Balanovsky A. E., Shtayger M. G. Plasma-arc surface modification of metals in a liquid medium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 411, no. 1, article 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/411/1/012013.
35. Kondrtiev V. V., Govorkov A. S., Kolosov A. D., Gorovoy V. O., Karlina A. I. The development of a test stand for developing technological operation «flotation and separation of MD2. The deposition of nanostructures MD1» produce nanostructures with desired properties. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 22, pp. 12373 – 12377.
36. Alekseev V. S., Banshchikova T. S. Extraction of refractory forms of gold from gravity concentrates and placer tailings using chemical reagents. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2017, no. 4, pp. 159 – 164. [In Russ].
37. Nemarov A. A., Lebedev N. V. Theoretical and experimental research of parameters of pneumatic aerators and elementary cycle flotation. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no. 20, pp. 10222 – 10226.
38. Efremenkov E. A., Shanin S. A., Martynushev N. V. Development of an algorithm for computing the force and stress parameters of a cycloid reducer. *Mathematics*. 2023, vol. 11, no. 4, article 993. DOI: 10.3390/math11040993.
39. Chipfunhua D., Bournivalc G., Dickieb S., Atac S. Performance characterisation of new frothers for sulphide mineral flotation. *Minerals Engineering*. 2019, vol. 131, pp. 272 – 279.
40. Karamov D. N., Suslov K. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements. *Energy Reports*. 2021, vol. 7, pp. 349 – 358. DOI: 10.1016/j.egy.2021.01.059.

41. Shemetov P. A., Glotov G. N. Theoretical foundations of automated geotechnology systems for underground uranium leaching. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 11, pp. 35 – 40. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Панфилов Илья Александрович^{1,2,3} – канд. техн. наук, доцент, e-mail: crook_80@mail.ru,

Шепета Наталья Александровна^{1,2} – канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: Shepeta_NA@mail.ru,

Ступина Алена Александровна^{1,2} – д-р техн. наук, профессор; Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, e-mail: h677hm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5564-9267,

Бойко Андрей Анатольевич^{1,2,3} – канд. экон. наук, доцент ВАК, доцент, e-mail: boiko@sibsau.ru, ORCID ID: 0000-0001-7185-2890,

Кондратьев Виктор Викторович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН, e-mail: v.kondratiev@igc.irk.ru

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,

² Сибирский федеральный университет,

³ НОЦ Технологии искусственного интеллекта, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана.

Для контактов: Панфилов И.А., e-mail: crook_80@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.A. Panfilov^{1,2,3}, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: crook_80@mail.ru,

N.A. Shepeta^{1,2}, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor, e-mail: Shepeta_NA@mail.ru,

A.A. Stupina^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), Professor; Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service of Ministry of Emergency Situations of Russia, 662972, Zheleznogorsk, Russia, e-mail: h677hm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5564-9267,

A.A. Boyko^{1,2,3}, Cand. Sci. (Econ.), Assistant Professor, e-mail: boiko@sibsau.ru, ORCID ID: 0000-0001-7185-2890,

V.V. Kondratiev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 664523, Irkutsk, Russia,

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk Russia,

² Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia,

³ Artificial Intelligence Technology Scientific and Education Center, Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia.

Corresponding author: I.A. Panfilov, e-mail: crook_80@mail.ru.

Получена редакцией 06.07.2023; получена после рецензии 20.09.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 06.07.2023; received after the review 20.09.2023; accepted for printing 10.10.2023.