



Оригинальная статья

УДК 622.272/275.34; 504.05/06:622.34

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-511-518

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2345>



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

В. И. Голик^{1,2}, О. З. Габараев¹, Ю. И. Разоренов³, С. А. Масленников⁴

¹ Северо-Кавказский государственный технологический университет (Россия, 363021, Республика Северная Осетия – Алания, Владикавказ, ул. Николаева, 44)

² Московский политехнический университет (Россия, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, 38)

³ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (Россия, 346428, Ростовская обл., Новочеркасск, ул. Просвещения, 132)

⁴ Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета (Россия, 346500, Ростовская обл., Шахты, ул. Шевченко, 147)

Аннотация. Обозначена проблема истощения доступных минерально-сырьевых ресурсов и охарактеризованы причины ее актуализации из-за неполного извлечения металлов из добытых руд. Авторы отмечают, что стратегией горной отрасли может быть использование нетрадиционных технологий добычи металлов в рамках комбинирования традиционных и инновационных технологий выщелачивания. Обосновано, что утилизация хвостов обогащения, формирование алгоритма процессов и инженерный прогноз перспективной технологии являются реальным направлением развития горного производства. Статья описывает методику экспериментального обоснования возможности безотходной утилизации хвостов обогащения железистых кварцитов Курской магнитной аномалии. Приведены матрицы планирования и результаты сравнения технологий традиционного выщелачивания хвостов обогащения в агитаторах и выщелачивания в скоростной мельнице-дезинтеграторе с регрессионным анализом экспериментальных данных и графической интерпретацией. Дана справка о процессах механоактивации, как реальной возможности улучшения показателей процессов переработки металлосодержащего сырья, в том числе при вовлечении в производство хвостов обогащения. Полученные результаты экспериментов могут быть востребованы в гидрометаллургических процессах, включая выщелачивание металлов из хвостов обогащения, повышая их извлечение. Приведены сведения о содержании металлов во вторичных хвостах после выщелачивания в дезинтеграторе с механохимической активацией процессов. Авторы обозначили направления совершенствования процессов подготовки металлосодержащего сырья к выщелачиванию в дезинтеграторах-активаторах. Показано, что экономическая эффективность безотходной утилизации хвостов обогащения складывается стоимостью извлеченных металлов, сырья для смежных отраслей и снижения ущерба окружающей среде от хранения токсичных хвостов первичной переработки.

Ключевые слова: горное производство, хвосты обогащения, методика, эксперимент, железистые кварциты

Для цитирования: Голик В.И., Габараев О.З., Разоренов Ю.И., Масленников С.А. Исследование процессов выщелачивания металлов из хвостов обогащения руд // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 511–518. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-511-518>

Original article

METAL LEACHING FROM ORE DRESSING TAILINGS

V. I. Golik^{1,2}, O. Z. Gabaraev¹, Yu. I. Razorenov³, S. A. Maslennikov⁴

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz, Republic of North Ossetia – Alania 362021, Russian Federation)

² Moscow Polytechnic University (38 Bol'shaya Semenovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation)

³ Platov South-Russian State Polytechnic University (132 Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, Rostov Region 346428, Russian Federation)

⁴ Institute of Service and Entrepreneurship (Branch) of the Don State Technical University (147 Shevchenko Str., Shakhty, Rostov Region 346500, Russian Federation)

Abstract. The problem of depletion of available mineral resources is identified and the reasons for its actualization are characterized due to incomplete extraction of metals from mined ores. It is noted that the strategy of the mining industry may be the use of unconventional technologies of metal extraction within the framework of combining traditional technologies with innovative leaching ones. It is proved that utilization of enrichment tailings, formation of the processes algorithm and engineering forecast of the prospects of the new technology are the real directions of mining production development. The paper considers a method of experimental substantiation of the possibility of waste-free utilization of ferruginous quartzite dressing

tailings from the Kursk Magnetic Anomaly. The planning matrices and the results of comparing the technologies of traditional leaching of dressing tailings in conditioners and leaching in a high-speed disintegrator mill are presented with regression analysis of experimental data and graphical interpretation. A reference is given on the processes of mechanical activation, as a real opportunity to improve the indicators of the processing metal-containing raw materials, including involving dressing tailings in production. The experimental results obtained can be used in hydrometallurgical processes, including leaching of metals from dressing tailings, increasing the extraction of metals with a higher content. The paper considers the data on the metals content in secondary tailings after leaching in a disintegrator with mechanochemical processes activation. The directions of improvement of preparation of metal-containing raw materials for leaching in conditioners – disintegrators are indicated. The economic efficiency of waste-free disposal of dressing tailings is composed of the cost of extracted metals, raw materials for related industries and reducing environmental damage from the storage of toxic tailings of primary processing.

Keywords: mining, dressing tailings, methodology, experiment, ferruginous quartzites

For citation: Golik V.I., Gabaraev O.Z., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A. Metal leaching from ore dressing tailings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 511–518. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-511-518>

ВВЕДЕНИЕ

В середине XX столетия перед горными отраслями России встала проблема истощения доступных для добычи минерально-сырьевых ресурсов.

Проблема использования минерально-сырьевых ресурсов заключается в недостаточно полном использовании запасов, в первую очередь неполным извлечением компонентов из добытого сырья. В связи с этим в хвостах переработки большинства руд стоимость не извлеченных компонентов нередко сравнима со стоимостью извлеченных [1 – 3].

Причиной кризиса горного производства является применение устаревших технологий добычи, обогащения и металлургического передела руд. Стратегией выживания горных отраслей может стать использование нетрадиционных технологий добычи металлов в рамках комбинирования традиционных и инновационных технологий выщелачивания, которые являются основными на 12 предприятиях России [4 – 7].

Вопросы выщелачивания металлов формируют актуальную научную и практическую проблему, включающую в себя анализ теории и практики, вопросы подготовки металлосодержащих ресурсов и выбора рациональных схем комбинирования технологий добычи металлов традиционным способом и выщелачиванием.

Традиционные технологии обогащения не обеспечивают полного раскрытия минералов, поэтому обогатительные процессы совершенствуются путем привлечения операций гидрометаллургической переработки.

Реализация стратегии ресурсосбережения нуждается в разработке научных основ, регламентирующих решение вопросов перевода металлов в мобильное состояние, извлечения металлов из раствора, утилизации продуктов технологии со снижением техногенной нагрузки на окружающую среду [8 – 11].

Целью настоящего исследования является утилизация хвостов обогащения железистых кварцитов, формирование алгоритма процессов и инженерный прогноз перспектив новой технологии.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются хвосты мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов обогатительной фабрики Лебединского ГОКа, содержащие до 80 % фракции менее 0,076 мм, представленные кварцем, магнетитом, гематитом, карбонатами и другими минералами, в составе которых 8 % Fe, 5 % Al, 3 % Mn и др.

Химический состав отобранной для исследования пробы хвостов, % (по массе): 64,0 SiO₂; 8,0 Fe; 5,2 Al₂O₃; 3,2 Mn; 0,7 K₂O; 0,1 P; 0,8 Ca; 0,2 MgO; 5·10⁻³ Cu; 4·10⁻³ Ni; 5·10⁻⁴ Zn; As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y – на уровне (30 – 50)·10⁻⁵.

При ранжировании технологий переработки хвостов обогащения в качестве базы для сравнения используются результаты выщелачивания доступными альтернативными методами.

Для проведения экспериментов использованы лабораторный дезинтегратор ДЕЗ-11 и электромеханическая мешалка с реакционным сосудом. Комплекс исследования процесса выщелачивания металлов включает в себя операции, показанные на рис. 1.

Хвосты обогащения перерабатываются альтернативными методами выщелачивания с получением количественных характеристик процессов, которые становятся критерием оценки технологий.

Содержание реагентов в зависимости от решаемой задачи изменяется, г/л: серной кислоты – 2 – 10; хлорида натрия – 20 – 160.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки эффективности извлечения металлов из хвостов обогащения в качестве базы использовали результаты агитационного выщелачивания (рис. 2).

Для извлечения металлов в раствор использованы лабораторный дезинтегратор ДЕЗ-11 и электромеханическая мешалка. Комплекс исследования процесса извлечения металлов включал в себя операции:

- измельчение до крупности – 2 мм;
- сушка при температуре 60 °С до влажности 2 %;
- отбор и подготовка пробы;

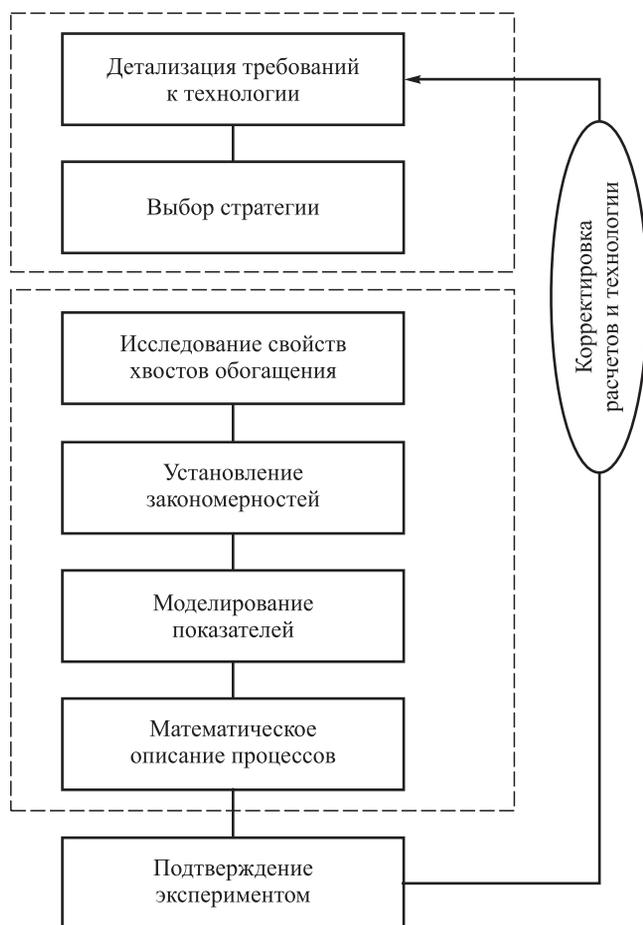


Рис. 1. Алгоритм исследования эффективности выщелачивания

Fig. 1. Algorithm for investigating the leaching effectiveness

- хранение в эксикаторе;
- выщелачивание.

Для дальнейших исследований использовали результаты выщелачивания хвостов обогащения в агитаторе и дезинтеграторе. Выполнен регрессионный анализ экспериментальных данных. Результаты проб сгруппированы и усреднены.



Рис. 2. Способы извлечения металлов из хвостов обогащения

Fig. 2. Methods for extracting metals from the dressing tailings

Результаты агитационного извлечения металлов из неактивированных хвостов представлены в табл. 1, 2.

Зависимость извлечения металла из неактивированных хвостов от содержания реагентов показана на рис. 3.

Зависимость извлечения металла от соотношения переменных факторов показана на рис. 4.

Результаты переработки хвостов обогащения в дезинтеграторе представлены в табл. 3, регрессионный анализ – в табл. 4.

Зависимость извлечения металла из хвостов обогащения от содержания реагентов показана на рис. 5.

Зависимость извлечения металлов от соотношения жидкого и твердого и продолжительности выщелачивания показана на рис. 6.

При содержании в хвостах обогащения 8 % Fe, за один цикл извлекается 1 % Fe, за три – 3 %. Содержание металлов во вторичных хвостах не превышает допустимых значений (табл. 5).

Таблица 1

Матрица планирования и результаты выщелачивания

Table 1. Planning matrix and leaching results

Номер	Содержание, г/л		Соотношение жидкого и твердого	Продолжительность, ч	Извлечение железа, %
	H ₂ SO ₄	NaCl			
1	2 (-1)	160 (1)	4 (-1)	0,25 (-1)	1,7
2	2 (-1)	160 (1)	10 (1)	0,25 (-1)	2,7
3	2 (-1)	160 (1)	4 (-1)	1 (1)	2,8
4	2 (-1)	160 (1)	10 (1)	1 (1)	3,2
5	6 (0)	160 (1)	7 (0)	0,625 (0)	2,9
Диапазон изменения показателя извлечения					1,7 – 3,2
В скобках приведены уровни варьирования переменных факторов.					

Таблица 2

Регрессионный анализ извлечения металлов из неактивированных хвостов

Table 2. Regression analysis of metal extraction from non-activated tailings

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon = 2,095 + 1,231X_1 + 0,444X_2 + 0,275X_3 + 0,176X_4 +$ $+ 0,290X_1^2 + 0,330X_2^2 - 0,325X_3^2 + 0,225X_4^2 -$ $- 0,127X_1X_2 + 0,047X_2X_3 + 0,036X_3X_4$	$R^2 = 0,977$ $S_{ad} = 0,0673$ $F = 225,99$

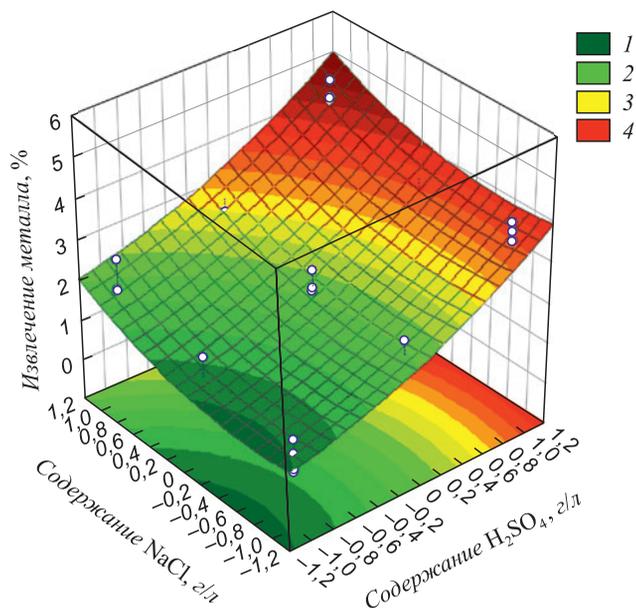


Рис. 3. Зависимость извлечения металла из неактивированных хвостов от содержания реагентов

Fig. 3. Dependence of metal extraction on the reagents content

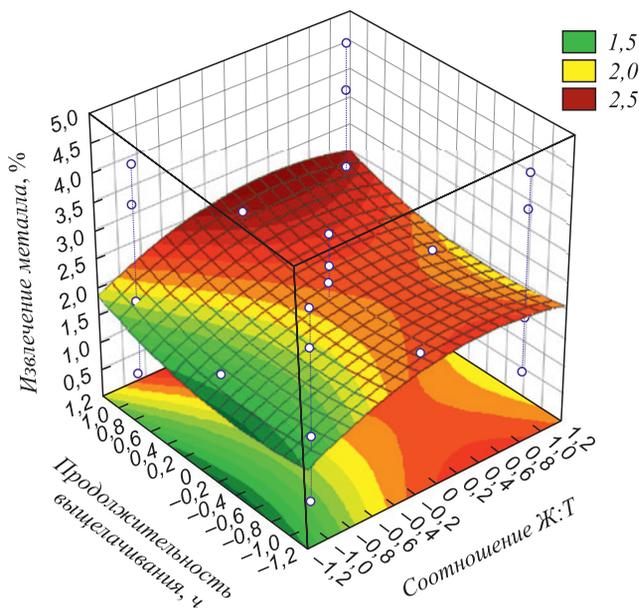


Рис. 4. Зависимость извлечения металла от переменных факторов

Fig. 4. Dependence of metal extraction on variable factors

Таблица 3

Результаты переработки в дезинтеграторе

Table 3. Results of processing in the disintegrator

Номер	Содержание в растворе, г/л		Частота вращения роторов, Гц	Продолжительность, ч	Извлечение железа, %
	H ₂ SO ₄	NaCl			
1	2 (-1)	160 (1)	50 (-1)	0,25 (-1)	2,6
2	2 (-1)	160 (1)	200 (1)	0,25 (-1)	3,2
3	2 (-1)	160 (1)	200 (1)	1 (1)	4,4
4	2 (-1)	160 (0)	125 (0)	0,625 (0)	2,8
5	6 (0)	160 (-1)	125 (0)	0,625 (0)	3,9
Диапазон изменения показателя извлечения					2,6 – 4,4
В скобках приведены уровни варьирования независимых переменных.					

Растворы выщелачивания после извлечения из них железа укрепляются реагентами и используются в дальнейших циклах. По завершению процесса они нейтрализуются по известной технологии.

Остальные металлы в дезинтеграторе так же переводятся в раствор и могут быть выделены в твердый осадок специальными методами гидрометаллургии, которые в данной статье не рассматриваются.

Регрессионный анализ переработки хвостов обогащения в дезинтеграторе

Table 4. Regression analysis of enrichment tailings processing in a disintegrator

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon = 3,091 + 2,381X_1 + 1,015X_2 + 0,698X_3 + 0,583X_4 +$ $+ 1,034X_1^2 + 1,104X_2^2 - 0,276X_3^2 - 0,176X_4^2 +$ $+ 0,259X_1X_3 - 0,268X_1X_4 + 0,255X_2X_3 + 0,339X_2X_4 + 0,315X_3X_4$	$R^2 = 0,9384$ $S_{ad} = 1,0111$ $F = 43,03$

Таблица 5

Содержание элементов во вторичных хвостах, %

Table 5. Content of the elements in secondary tailings, %

Химический элемент	Вид выщелачивания		
	агитационное	агитационное после дезинтегратора	в дезинтеграторе
Медь	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Никель	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Цинк	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$
Мышьяк	$48 \cdot 10^{-6}$	$48 \cdot 10^{-6}$	$45 \cdot 10^{-6}$
Бериллий	$25 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$
Кобальт	$42 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$35 \cdot 10^{-6}$
Хром	$47 \cdot 10^{-6}$	$46 \cdot 10^{-6}$	$44 \cdot 10^{-6}$
Молибден	$48 \cdot 10^{-6}$	$45 \cdot 10^{-6}$	$43 \cdot 10^{-6}$
Свинец	$34 \cdot 10^{-6}$	$34 \cdot 10^{-6}$	$31 \cdot 10^{-6}$
Сурьма	$50 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$	$48 \cdot 10^{-6}$
Олово	$55 \cdot 10^{-6}$	$52 \cdot 10^{-6}$	$45 \cdot 10^{-6}$
Стронций	$37 \cdot 10^{-6}$	$37 \cdot 10^{-6}$	$35 \cdot 10^{-6}$
Титан	$48 \cdot 10^{-6}$	$42 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$
Ванадий	$52 \cdot 10^{-6}$	$48 \cdot 10^{-6}$	$45 \cdot 10^{-6}$

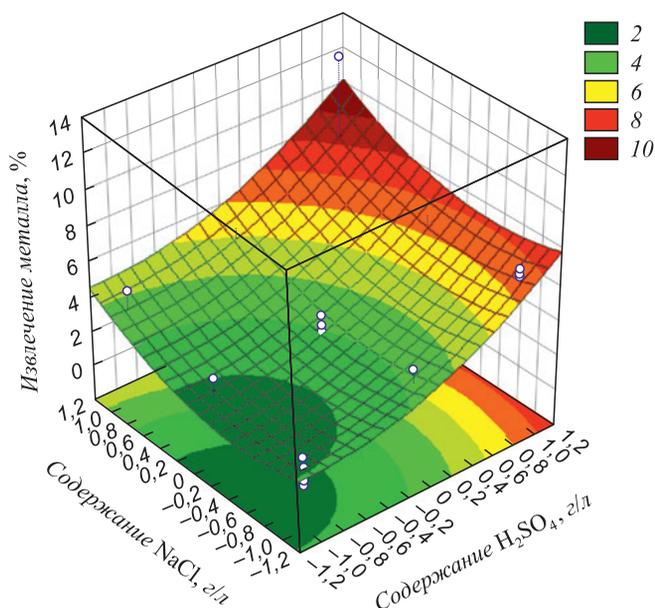


Рис. 5. Зависимость извлечения металла из хвостов обогащения в дезинтеграторе от содержания реагентов

Fig. 5. Dependence of metal extraction from enrichment tailings

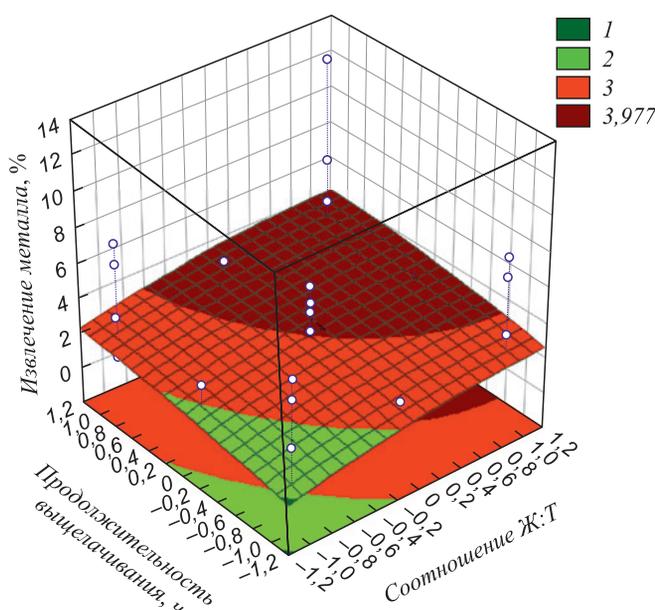


Рис. 6. Зависимость извлечения металла от соотношения факторов

Fig. 6. Dependence of metal extraction on the ratio of factors

Для получения максимального извлечения железа из раствора (4,4 %) рекомендуются следующие параметры:

- содержание в растворе 2 г/л серной кислоты и 160 г/л хлорида натрия;
- частота вращения роторов 200 Гц;
- продолжительность выщелачивания 1 ч.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди способов извлечения металлов особое место занимает механоактивация руд, улучшая показатели процессов переработки [12 – 14].

Физико-химическая активность, растворимость и энергия активации минералов зависят от их дисперсности и параметров изменения кристаллической

структуры. При увеличении количества дефектов в кристаллической структуре, она трансформируется в аморфную. Это обусловлено пластической деформацией, локализованной в поверхностном слое, толщиной при сухом измельчении 15 – 20 мкм и при мокром 1,5 – 2 мкм.

В области использования дезинтеграторной техники при производстве железосодержащих продуктов выделяют направления: измельчение губчатого железа, дезинтеграция спеков после обжига, дробление конгломератов промежуточных продуктов и обработка с корректировкой свойств [15 – 16].

Результаты, полученные в процессе экспериментов, находят применение в гидрометаллургических процессах разделения компонентов, в том числе для выщелачивания металлов из руд, повышая извлечение компонентов.

При активации в шаровых и планетарных мельницах эффект достигается за счет увеличения частоты соударения мелющих тел.

Скорость извлечения металлов повышают комбинированием мельниц и химических реакторов, что обеспечивает изменение химических свойств вещества с накоплением свободной энергии. Наибольшее извлечение металла в раствор достигается при минимальной поверхности частиц.

Увеличение скорости извлечения металла при обновлении площади реагирования происходит за счет снятия прореагировавшего слоя и увеличения поверхностной энергии частиц при механоактивации.

Экономическая эффективность безотходной утилизации хвостов обогащения формируется совокупностью стоимости извлеченных металлов, сырья для соседствующих отраслей хозяйства и снижения ущерба окружающей среде от хранения хвостов [17, 18].

Прибыль от утилизации хвостов обогащения определяется соотношением суммы затрат и размеров капитальных вложений.

Выводы

Экспериментально доказана возможность безотходной утилизации хвостов обогащения железистых кварцитов с использованием предложенного алгоритма.

Инженерный прогноз перспектив технологии указывает на целесообразность ее применения за счет вовлечения в производство хвостов первичной переработки металлических руд.

Реализация на практике гидрометаллургических процессов при выщелачивании металлов из бедного сырья нуждается в комплексном совершенствовании процессов его подготовки к переработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Голик В.И., Ляшенко В.И. Новые технологии и технические средства для утилизации хвостов обогащения руд // КАЗАНТИП-ЭКО-2016. Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго- и ресурсосбережения: Сборник трудов XXIV Международной научно-практической конференции, 6 – 10 июня 2016 г., Харьков. Харьков: УкрНТЦ «Энергосталь», 2016. С. 284–297.
2. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // *Hydrometallurgy*. 2015. Т. 157. P. 306–324. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
3. Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Вандышев А.М. Кафедре горного дела УГГУ – 100 лет // *Известия вузов. Горный журнал*. 2020. № 8. С. 130–143.
4. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Разоренов Ю.И., Масленников С.А., Ляшенко В.И. Механохимическая технология извлечения железа из хвостов обогащения // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 4. С. 282–291. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-282-291>
5. Doifode S.K., Matani A.G. Effective industrial waste utilization technologies towards cleaner environment // *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. 2015. Vol. 4. P. 536–540.
6. Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020. № 2. С. 283–290.
7. De Oliveira D.M., Sobral L.G.S., Olson G.J., Olson S.B. Acid leaching of a copper ore by sulphur-oxidizing microorganisms // *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 147–148. P. 223–227. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.019>
8. Голик В.И. К проблеме охраны окружающей среды российского Донбасса // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 2. С. 32–38.
1. Golik V.I., Lyashenko V.I. New technologies and technical means for utilization of ore dressing tailings. In: *KAZANTIP-ECO-2016. Innovative Ways to solve Urgent Problems of Basic Industries, Ecology, Energy and Resource Saving: Transactions of the XXIV Int. Sci.-Pract. Conf., June 6-10, 2016, Kharkiv*. Kharkiv: UkrNTTs Energostal', 2016, pp. 284–297. (In Russ.).
2. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015, vol. 157, pp. 306–324. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
3. Valiev N.G., Propp V.D., Vandyshv A.M. The 100th Anniversary of the UGSU Chair of Mining. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2020, no. 8, pp. 130–143. (In Russ.).
4. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A., Lyashenko V.I. Mechanochemical technology of iron extraction from enrichment tailings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 282–291. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-282-291>
5. Doifode S.K., Matani A.G. Effective industrial waste utilization technologies towards cleaner environment. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. 2015, vol. 4, pp. 536–540.
6. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Maier A. V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the use of effective technologies to improve the sustainable development of natural- technical system. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii*. 2020, no. 2, pp. 283–290. (In Russ.).
7. De Oliveira D.M., Sobral L.G.S., Olson G.J., Olson S.B. Acid leaching of a copper ore by sulphur-oxidizing microorganisms. *Hydrometallurgy*. 2014, vol. 147–148, pp. 223–227. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.019>
8. Golik V.I. To the problem of environmental protection of the Russian Donbass. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2022, no. 2, pp. 32–38. (In Russ.).

9. Половов Б.Д., Валиев Н.Г., Кокарев К.В. Особенности имитационного анализа уровней геомеханических рисков горнотехнических объектов // Горный журнал. 2016. № 12. С. 8–13.
10. Hu Z., Wang P., Li J. Ecological restoration of abandoned mine land in China // Journal of Resources and Ecology. 2012. Vol. 3. No. 4. P. 289–296. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2012.04.001>
11. Karimi N.S., Atashpanjeh A., Mollaei F.M.R. Design considerations of heap leaching at Sarcheshmeh copper open pit mine // 17th Int. Mining Congress and Exhibition of Turkey – IMCET 2001. 2001. P. 513–516.
12. Еремеева Ж.В., Шарипзянова Г.Х. Состав диффузионных слоев и влияние типа активатора на структуру получаемых при диффузионном хромосилировании порошковых материалов // Технология металлов. 2007. № 7. С. 35–37.
13. Randolph E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide/supergene and sulfide heap leach // Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Heap Leach Solution. Lima. 2015. P. 36–44.
14. Haverkamp R.G., Kruger D., Rajashekar R. The digestion of New Zealand ilmenite by hydrochloric acid // Hydrometallurgy. 2016. Vol. 163. P. 198–203. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.04.015>
15. Петров Ю.С., Хадзарогова Е.А., Соколов А.А., Шарипзянова Г.Х., Таскин А.В. Основные принципы получения, передачи и хранения информации о параметрах техногенного цикла горно-металлургического предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 11–1. С. 178–188. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-111-0-178-188>
16. 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. P. 40–57. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
17. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Пузин В.С., Стась Г.В. Дифференцированная оценка устойчивости обнажений горных пород при поэтапно-камерной системе разработки с закладкой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 5. С. 85–93.
18. Wang H., He Y., Duan C., Zhao Y., Tao Y., Ye C. Development of mineral processing engineering education in China University of Mining and Technology // Advances in Intelligent and Soft Computing. 2012. Vol. 141 AISC. P. 77–83. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27948-5_11
9. Polovov B.D., Valiev N.G., Kokarev K.V. Features of simulation analysis of geomechanical risk levels in mines. *Gornyi zhurnal*. 2016, no. 12, pp. 8–10. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.12.02>
10. Hu Z., Wang P., Li J. Ecological restoration of abandoned mine land in China. *Journal of Resources and Ecology*. 2012, vol. 3, no. 4, pp. 289–296. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2012.04.001>
11. Karimi N.S., Atashpanjeh A., Mollaei F.M.R. Design considerations of heap leaching at Sarcheshmeh copper open pit mine. In: *17th Int. Mining Congress and Exhibition of Turkey — IMCET 2001*. 2001, pp. 513–516.
12. Eremeeva Zh.V., Sharipzyanova G.Kh. Composition of diffusion layers and the effect of activator type on structure of powder materials obtained during diffusion chromosilication. *Tekhnologiya metallov*. 2007, no. 7, pp. 35–37. (In Russ.).
13. Randolph E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide/supergene and sulfide heap leach. In: *Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Heap Leach Solution. Lima*. 2015, pp. 36–44.
14. Haverkamp R.G., Kruger D., Rajashekar R. The digestion of New Zealand ilmenite by hydrochloric acid. *Hydrometallurgy*. 2016, vol. 163, pp. 198–203. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.04.015>
15. Petrov Yu.S., Khadzaragova E.A., Sokolov A.A., Sharipzyanova G.Kh., Taskin A.V. Acquisition, transmission and storage of information on production-induced cycle in mining and metallurgy: Outlines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020, no. 11–1, pp. 178–188. (In Russ.). <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-111-0-178-188>
16. 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. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
17. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Puzin V.S., Stas' G.V. Differentiated assessment of the stability of rock outcrops in a sub-store-chamber processing system with an attel. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2021, no. 5, pp. 85–93. (In Russ.).
18. Wang H., He Y., Duan C., Zhao Y., Tao Y., Ye C. Development of mineral processing engineering education in China University of Mining and Technology. *Advances in Intelligent and Soft Computing*. 2012, vol. 141 AISC, pp. 77–83. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27948-5_11

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Иванович Голик, д.т.н., профессор кафедры «Горное дело», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет); профессор кафедры «Металлургия», Московский политехнический университет

ORCID: 0000-0002-1181-8452

E-mail: v.i.golik@mail.ru

Олег Знаурович Габараев, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Горное дело», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

E-mail: kafedra-trm@skgmi-gtu.ru

Юрий Иванович Разоренов, д.т.н., профессор, ректор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова

ORCID: 0000-0001-8171-0749

E-mail: yiri1963@mail.ru

Станислав Александрович Масленников, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Строительство и техносферная безопасность», Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета

E-mail: maslennikovsa@mail.ru

Vladimir I. Golik, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Mining Engineering, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University); Prof. of the Chair of Metallurgy, Moscow Polytechnic University

ORCID: 0000-0002-1181-8452

E-mail: v.i.golik@mail.ru

Oleg Z. Gabaraev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Mining Engineering, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

E-mail: kafedra-trm@skgmi-gtu.ru

Yurii I. Razorenov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Platov South-Russian State Polytechnic University

ORCID: 0000-0001-8171-0749

E-mail: yiri1963@mail.ru

Stanislav A. Maslennikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Construction and Technosphere Safety, Institute of Service and Entrepreneurship (Branch) of the Don State Technical University

E-mail: maslennikovsa@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В. И. Голик – научное руководство, формирование выводов.
О. З. Габараев – анализ результатов исследований.
Ю. И. Разоренов – доработка текста.
С. А. Масленников – иллюстрирование текста.

V. I. Golik – scientific guidance, formation of the conclusions.
O. Z. Gabaraev – analysis of the research results.
Yu. I. Razorenov – revision of the text.
S. A. Maslennikov – illustration of the text.

Поступила в редакцию 21.03.2022
После доработки 18.04.2022
Принята к публикации 25.04.2022

Received 21.03.2022
Revised 18.04.2022
Accepted 25.04.2022