

УДК 504.55.054:662 (470.6)

**В.И. Голик, С.Г. Страданченко, С.А. Масленников,
Д.И. Шинкарь**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОТЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ *

Приведены результаты экспериментального исследования параметров извлечения металлов из хвостов переработки с активацией в дезинтеграторе ДЕЗ-11. Определено, что комплексирование энергии механического, химического и активационного воздействия на минералы существенно увеличивает извлечение металлов.

Ключевые слова: извлечение металлов, хвосты обогащения, активация, дезинтегратор, регрессионный анализ, энергия, раствор, переменные факторы, экономика.

Экологическая безопасность разработки месторождения полезного ископаемого определяется не только влиянием используемой техники и технологии на окружающую среду, но и возможностью безопасной утилизации отходов. Проблема радикального повышения полноты извлечения полезных компонентов, и, соответственно, перевода значительных объемов некондиционного, с точки зрения применяемой сейчас техники и технологий, сырья в разряд кондиционного, может быть решена применением комплексных методов сочетающих механическую подготовку (активацию) сырья и его химическую обработку (выщелачивание). Снижение содержания полезных компонентов (металлов) до предусмотренных законодательством норм позволит складировать и безопасно хранить хвосты переработки длительное время, либо использовать их при производстве закладочных смесей (для заполнения подземных

пустот), строительных материалов и т. д.

Для разработки технологических основ и средств экологически безопасной и экономически эффективной переработки некондиционного по содержанию металлов минерального сырья авторами проведены исследования зависимости полноты извлечения металлов из хвостов переработки. Эксперименты были выполнены с использованием дезинтегратора ДЕЗ-11, в конструкцию которого внесены изменения, установлены узлы подачи и приемки продукционных растворов.

Комплекс исследований включал в себя:

1. Исследование свойств хвостов обогащения.
2. Агитационное выщелачивание металлов реагентами.
3. Выщелачивание металлов реагентами в сочетании с активацией в дезинтеграторе [2].

В качестве критерия оценки эффективности выбрана величина извле-

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации: Государственный контракт № 16.515.11.5039 «Разработка безотходных экологически безопасных способов добычи и переработки руд месторождений Северного Кавказа на основе комбинирования традиционных и инновационных технологий».

чения металлов, устанавливаемая на основании химического анализа проб.

1. Исследования по первому пункту показали, что хвосты имеют следующий состав: крупнозернистые граниты — 40 %; порфириты — 30 %; песчаники — 20 %; жильный материал — 8 %; рудные минералы — 2 %. Содержание металлов в хвостах: пирит — 1,4 %; сфалерит — 0,6 %; галенит — 0,06 %; халькопирит — 0,05 % [1].

Породы: граниты, плагиоклаз, микроклин, кварц, карбонат, хлорит, порфирит, песчаник имели размер зерен от 0,03 до 3 мм. Жильные минералы: кварц, карбонат, кальцит, хлорит, сидериты характеризуются размером зерен — до 0,3 мм.

Руды садонских месторождений обогащаются в тяжелых суспензиях. Согласно статистическому анализу проб для всей выборочной совокупности хвосты составляют 25—50 % от исходного питания по объему.

2. По второму пункту эксперимент включал в себя: отборы проб массой по 50 г, приготовление выщелачивающего раствора заданного состава (см. табл. 1 и 2), добавление исследуемого материала и выщелачивающего раствора в реакционный сосуд, проведение агитационного выщелачивания в течение заданного времени, фильтрование продукционного раствора, химический анализ содержания в растворе металлов.

В каждой точке плана проводилось по 5 экспериментов. Найденные значения осреднялись для исследуемых партий, что позволяет уменьшить ошибку измерений, согласно нормальному закону распределения, более чем в два раза.

Переменные факторы, варьировались по следующим уровням:

1. Содержание серной кислоты и хлорида натрия, X_1 , X_2 (менялось соответственно по уровням: X_1 -1 — 2, 0 — 7 и 1 — 12 г/л, X_2 -1 — 20, 0 — 100 и 1 — 180 г/л).

2. Соотношение Ж:Т, X_3 (менялось по уровням: X_3 — 1-4, 0 — 7 и 1 — 10).

3. Время агитационного выщелачивания, X_4 (менялось по уровням: X_4 -1 — 0,25, 0 — 0,625, 1 — 1 час).

Эксперименты осуществлялись с использованием методов планирования эксперимента по $3^{(k-p)}$ факторному плану, с 27 опытами и 3 центральными точками на блок.

3. По третьему пункту эксперимент включал в себя: отборы проб массой по 50 г., приготовление выщелачивающего раствора заданного состава, приготовление пульпы, смешиванием выщелачивающего раствора и исследуемой пробы, обработку пульпы в дезинтеграторе, фильтрование продуктового раствора, проведение химического анализа содержания металлов.

Переменные факторы, варьировались по следующим уровням:

1. Содержание серной кислоты и хлорида натрия, X_1 , X_2 и соотношение Ж:Т, X_3 менялись по тем же уровням, что и в предыдущей серии опытов.

2. Скорость вращения роторов дезинтегратора, X_5 (менялась по уровням: X_5 -1 -50, 0 — 125, 1 — 200 Гц).

Для построения математической модели исследуемого процесса использовались методы построения множественной регрессии. В общем случае, процедура множественной регрессии дает линейное уравнение в виде:

$$Y = a + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_kX_k$$

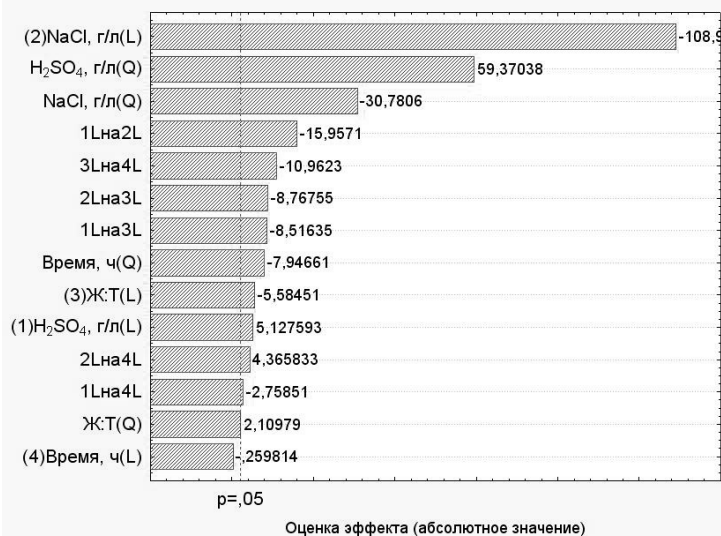
где k — число предикторов. Отметим, что в этом уравнении регрессионные коэффициенты ($a_1 \dots a_k$) представляют независимые вклады каждой независимой переменной в предсказание зависимой переменной.

В данном случае регрессионные зависимости определяют долю извлечения цинка и свинца из руды, по критерию Фишера гипотетические зависимости на уровне значимости 5 % принимаются как правдоподобные.

Таблица 1

Коэффициенты a_i для уравнения регрессии (ε_{Zn}) и (ε_{Pb})

	Для уравнения регрессии (ε_{Zn})			Для уравнения регрессии (ε_{Pb})		
	Регрес. коэф.	-95,% Дов. пред.	+95,% Дов. пред.	Регрес. коэф.	-95,% Дов. пред.	+95,% Дов. пред.
a	19,8	14,7	24,9	-16,9	-24,5	-9,37210
a ₁	12,4	11,8	12,8	2,75	2,03	3,46212
a ₂	-0,721	-0,747	-0,695	-0,196	-0,234	-0,15773
a ₃	-0,441	-0,47	-0,412	0,835	0,793	0,87760
a ₄	0,00146	0,0014	0,00156	-0,0038	-0,0039	-0,00365
a ₅	3,87	2,78	4,97	1,00	-0,612	2,61272
a ₆	-0,0712	-0,143	0,00073	-0,104	-0,209	0,00168
a ₇	-6,538	-13,6	0,553	-15,2	-25,6	-4,82848
a ₈	17,1	12,6	21,7	12,9	6,22	19,73435
a ₉	-0,00939	-0,0106	-0,00813	0,0044	0,0025	0,00622
a ₁₀	-0,134	-0,167	-0,1001	-0,0179	-0,067	0,03114
a ₁₁	-0,346	-0,614	-0,0787	-0,691	-1,08	-0,29887
a ₁₂	-0,0086	-0,0107	-0,00651	0,0097	0,0067	0,01281
a ₁₃	0,0342	0,0175	0,05096	-0,0096	-0,0341	0,01493
a ₁₄	-2,29	-2,74	-1,847	0,868	0,214	1,52222

**Рис. 1. Карта Парето для стандартизованных эффектов (ε_{Zn})**

Зависимости ищутся с учетом линейных, квадратичных эффектов и их взаимодействий в виде уравнения регрессии:

$$\varepsilon_{Zn,Pb} = a + a_1 \times X_1 - a_2 \times X_2 + a_3 \times X_3 + a_4 \times X_4 + a_5 \times X_1^2 + a_6 \times X_2^2 + a_7 \times X_3^2 + a_8 \times X_4^2 + a_9 \times X_1 X_2 + a_{10} \times X_1 X_3 -$$

$$- a_{11} \times X_1 X_4 + a_{12} \times X_2 X_3 + a_{13} \times X_2 X_4 + a_{14} \times X_3 X_4.$$

где X_1 — содержание H₂SO₄, г/л; X_2 — содержание NaCl, г/л; X_3 — соотношение Ж:Т; X_4 — время агитационного выщелачивания, ч; для опытов второй серии X_4 заменяем на X_5 ; X_5 — частота вращения роторов дезинтегратора, Гц.

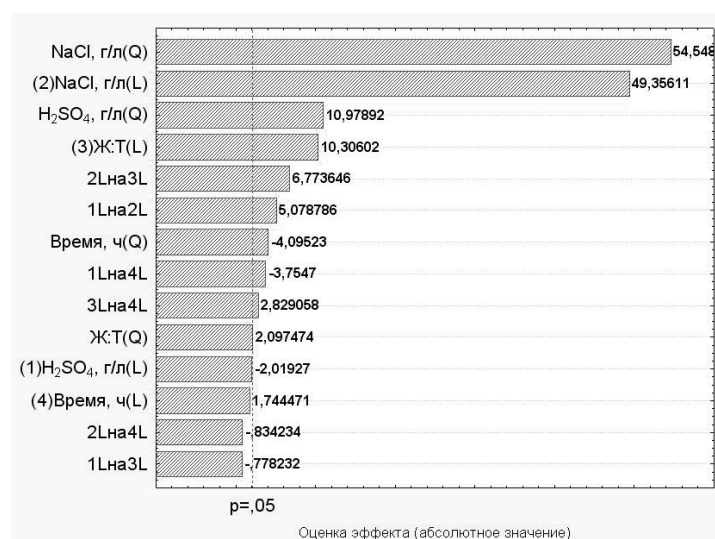


Рис. 2. Карта Парето для стандартизованных эффектов (ϵ_{Pb})

Таблица 2

Критические значения независимых переменных функции ϵ_{Zn} и ϵ_{Pb}

	Критические значения, переменная: Zn, %			Критические значения, переменная: Pb, %		
	Наблюд. мин.	Крит.	Наблюд. макс.	Наблюд. мин.	Крит.	Наблюд. макс.
H ₂ SO ₄ , г/л	2,0	6,94	12,0	2,0	7,17	12,0
NaCl, г/л	20,0	181,2	180,0	20,0	128,9	180,0
Ж:Т	4,0	4,1	10,0	4,0	12,0	10,0
Время, ч	0,25	0,353	1,0	0,25	0,424	1,0

Таблица 3

Коэффициенты a_i для уравнения регрессии (ϵ_{Zn}) и (ϵ_{Pb})

	Для уравнения регрессии (ϵ_{Zn})			Для уравнения регрессии (ϵ_{Pb})		
	Регрес. коэф.	-95,% Дов. пред.	+95,% Дов. пред.	Регрес. коэф.	-95,% Дов. пред.	+95,% Дов. пред.
a	69,11	62,4	75,8	-37,9	-56,1	-19,8
a ₁	7,57	6,93	8,2	7,13	5,42	8,85
a ₂	-0,239	-0,273	-0,205	-0,395	-0,487	-0,304
a ₃	-0,851	-0,889	-0,813	0,956	0,855	1,06
a ₄	0,0023	0,00217	0,00243	-0,0035	-0,0038	-0,0031
a ₅	-2,19	-3,62	-0,762	3,28	-0,602	7,16
a ₆	0,0343	-0,0594	0,128	-0,0823	-0,336	0,172
a ₇	-0,117	-0,163	-0,0709	-0,0522	-0,177	0,0729
a ₈	-0,00048	-0,00063	-0,00033	0,0001	-0,0003	0,0005
a ₉	-0,00319	-0,00482	-0,00156	-0,0032	-0,0077	0,0012
a ₁₀	-0,207	-0,25	-0,163	-0,275	-0,393	-0,156
a ₁₁	0,00499	0,00325	0,00673	-0,0013	-0,0061	0,0034
a ₁₂	0,00915	0,00643	0,0119	-0,0039	-0,0113	0,0034
a ₁₃	0,00111	0,00100	0,00122	-0,0001	-0,0004	0,0002
a ₁₄	0,0187	0,0158	0,0216	0,0034	-0,0045	0,0112

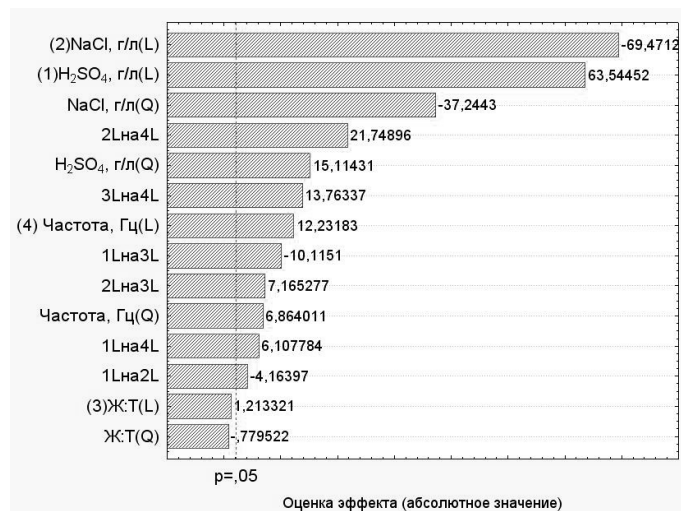


Рис. 3. Карта Парето для стандартизованных эффектов (ϵ_{Zn})

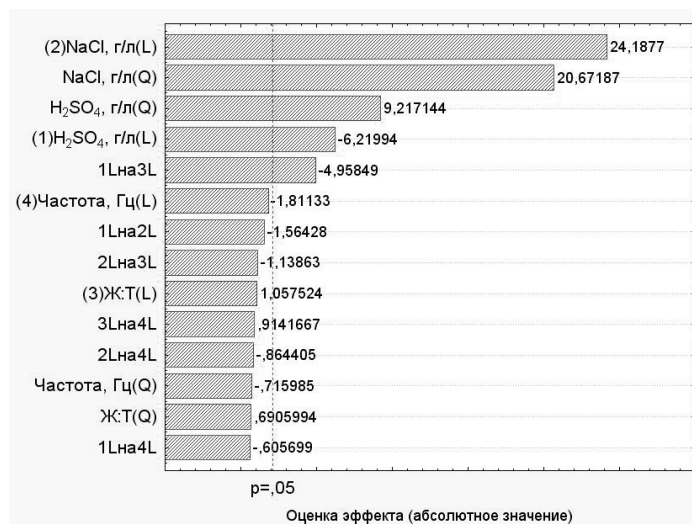


Рис. 4. Карта Парето для стандартизованных эффектов (ϵ_{Pb})

Таблица 4

Критические значения независимых переменных функции ϵ_{Zn} и ϵ_{Pb}

	Критические значения, переменная: Zn, %			Критические значения, переменная: Pb, %		
	Наблюд. мин.	Крит.	Наблюд. макс.	Наблюд. мин.	Крит.	Наблюд. макс.
H ₂ SO ₄ , г/л	2,0	15,1	12,0	2,0	3,94	12,0
NaCl, г/л	20,0	138,5	180,0	20,0	127,1	180,0
Ж:Т	4,0	4,33	10,0	4,0	12,5	10,0
Частота, Гц	50,0	200	200,0	50,0	111,1	200,0

Математическая обработка результатов экспериментов проводилась с помощью программы Statistica 6.1

Значимость влияющих факторов наглядно представлена на карте Парето для стандартизованных эффектов (рис. 1, 2), значком (L) обозначены линейные эффекты, (Q) квадратичные, 1L на 2L и т.д. — сочетания соответствующих факторов.

Агитационное выщелачивание убогих руд и хвостов обогащения обеспечивает извлечение металлов, но длится долго и проходит с высокими затратами энергии, что не соответствует оптимальной целевой функции в решаемой двухкритериальной оптимизационной задаче.

Ниже приведены итоги математической обработки результатов выщелачивания хвостов одновременно с процессом активации в рабочей камере дезинтегратора.

Процент извлечения цинка достигает максимальных значений в рассматриваемом диапазоне независимых факторов (см. табл. 4) при максимальном содержании в растворе H_2SO_4 и минимальном NaCl. Частота

вращения рабочего органа дезинтегратора существенно увеличивает выход цинка (см. рис. 3, 4), давая максимум при $X_5=200$ Гц. Выход свинца достигает наибольших значений при содержании $H_2SO_4=3,94$ г/л и $NaCl=127$ г/л, значительно меньшее влияние оказывает скорость вращения рабочего органа дезинтегратора.

Найденные величины независимых переменных при критических значениях зависимых приведены в табл. 4.

Как показал регрессионный анализ совмещение механического и химического методов воздействия на металлогосодержащие минералы увеличивает процент извлечения металлов (в 1,22 раза). При этом большее извлечение в раствор металлов обеспечивается в дезинтеграторе за время, на 2 порядка меньшее, чем при выщелачивании без активации.

Показатели комбинированного механо-химико-активационного процесса извлечения металлов могут быть улучшены за счет увеличения времени активации путем многократного пропускания пульпы через дезинтегратор [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Голик В.И.* Приоритетные пути развития горнодобывающего и перерабатывающего комплекса Северо-Кавказского региона / А.Е. Воробьев, В.И. Голик, Д.П. Лобанов. — Владикавказ: Рухс, 1998. — 358 с.
2. *Голик В.И.* Специальные способы разработки месторождений полезных ис-

копаемых /Т.Т. Исмаилов, В.И. Голик, Е.Б. Дольников. — М.: МГГУ, 2005. — 336 с.

3. *Голик В.И.* Извлечение металлов из хвостов обогащения комбинированными методами активации. С-Пб. Обогащение руд. 2010. №5. **ГЛАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Голик Владимир Иванович — доктор технических наук, профессор, e-mail: v.i.golik@mail.ru, Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт),

Страданченко Сергей Георгиевич — доктор технических наук, профессор, проректор по заочному и дистанционному образованию, e-mail: ssg72@mail.ru

Масленников Станислав Александрович — кандидат технических наук, доцент, e-mail: MaslennikovSA@mail.ru,

Шинкарь Денис Игоревич — аспирант, Шахтинский институт (филиал) Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт).