

УДК 622.7:622.341.1

Надутьий В.П., д-р техн. наук, профессор,
Чельшкіна В.В., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Маланчук Е.З., канд. техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДА КОНЦЕНТРАТА ЭЛЕКТРОСЕПАРАЦИИ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ БАЗАЛЬТОВЫХ ПОРОД

Надутьий В.П., д-р техн. наук, професор,
Чолишкіна В.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Маланчук Є.З., канд. техн. наук
(ИГТМ НАН України)

МОДЕЛЮВАННЯ ВИХОДУ КОНЦЕНТРАТУ ЕЛЕКТРОСЕПАРАЦІЇ МІДЕВМІСНИХ БАЗАЛЬТОВИХ ПОРІД

Naduty V.P., D. Sc. (Tech.), Professor,
Chelyshkina V.V., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Malanchuk Ye.Z., Ph.D. (Tech.),
(IGTM NAS of Ukraine)

MODELLING OF CONCENTRATE YIELD AFTER ELECTRIC SEPARATION OF THE COPPER-BEARING BASALTIC ROCKS

Аннотация. Базальтовые месторождения Ровенской и Житомирской областей Украины содержат самородную медь, окислы и карбонаты меди, самородное железо и титаномагнетит в объемах, представляющих промышленный интерес. Поэтому актуальна разработка комплексной технологии переработки базальтового сырья, которая обеспечит не только производство нерудных стройматериалов но и извлечение меди, железа, титана. При разработке такой технологии нами исследовался процесс электросепарации основных медесодержащих пород - базальта, туфа и лавобрекчии. На основании экспериментальных данных были установлены зависимости и разработана обобщенная регрессионная модель для определения выхода концентрата электросепарации при изменении крупности питания сепаратора в диапазоне $-1,0 + 0,05$ мм и напряжения поля на электродах $10 \div 30$ кВ. Полученные результаты указывают на целесообразность использования электросепарации в комплексной технологии переработки пород базальтовых месторождений Волыни и позволяют прогнозировать выход концентрата при электросепарации базальта, туфа и лавобрекчии.

Ключевые слова: электростатическая сепарация, выход концентрата, базальт, туф, лавобрекчия.

Развитие горно-металлургического комплекса Украины во многом определяется использованием цветных металлов, в частности, меди и титана. В этой связи существенный интерес представляют месторождения базальта расположенные на территории Ровенской и Житомирской областей Украины, где трапповая формация базальтов сопровождается сопутствующими породами - базальтовыми туфами и лавокластическими брекчиями.

Все указанные породы являются меденосными, общие запасы меди отдельных месторождений составляют от 0,5 млн. до 5 млн.т, суммарно месторождений Рафаловского и Жиричи -2 млн.т меди, [1, 2].

Базальт и сопутствующие породы включают самородную медь, медные минералы представлены в виде окислов и карбонатов (сульфидных мало), содержат самородное железо и титаномагнетит.

Такой сложный минеральный состав не позволяет в полной мере использовать известные технологии переработки медных руд и указывают на необходимость разработки комплексной технологии, в которой, с использованием известных операций рудоподготовки, возможно получение промпродуктов и концентратов меди, пригодных для пирометаллургии или последующего обогащения, [2].

В ИГТМ НАН Украины при разработке комплексной технологии переработки базальтового сырья исследовался процесс электросепарации базальта, туфа и лавобрекчии, отобранных на Рафаловском базальтовом карьере, Ровенской обл. При этом из исходной пробы весом около 3 кг выводили магнитную фракцию, остаток делили на три узких класса крупности, каждый из которых сепарировали отдельно на лабораторном электростатическом сепараторе типа ПС-1 при разном напряжении поля на электродах (табл.1), [3].

Таблица 1 - Выход концентрата электросепарации при изменении напряжения поля на электродах и крупности питания

Крупность питания, мм	Выход концентрата	Напряжение поля, кВ				
		10	15	20	25	30
Базальт						
-1,0 +0,63	%	2,78	4,44	6,30	7,93	10,37
-0,63 +0,25	%	1,85	2,78	3,52	3,70	5,56
-0,25 +0,05	%	0,74	1,30	1,85	2,04	2,59
Δ^1	ед.	1,00	1,62	2,22	2,54	3,41
Лавобрекчия						
-1,0 +0,63	%	1,48	2,78	4,07	4,44	5,74
-0,63 +0,25	%	1,11	2,04	2,59	2,78	3,33
-0,25 +0,05	%	0,93	1,48	1,85	2,04	2,30
Δ	ед.	1,00	1,77	2,36	2,57	3,12
Туф						
-1,0 +0,63	%	0,74	1,85	2,96	3,70	4,07
-0,63 +0,25	%	0,74	1,11	1,85	2,55	3,89
-0,25 +0,05	%	0,74	1,04	1,48	1,85	2,22
Δ	ед.	1,00	1,80	2,83	3,65	4,59

¹⁾ Δ -увеличение выхода концентрата в среднем по классам -1+0,05 мм относительно выхода при напряжении поля 10 кВ.

Из табл. 1 видно, что повышение напряжения с 10 до 30 кВ приводит к увеличению выхода концентрата в 3,12- 4,59 раз. Также можно видеть, что при любом напряжении поля на электродах и для любого класса крупности

питания, больше всего концентрата получается для базальта, далее следуют лавобрекчия и туф. Содержание меди в исходных пробах пород составляло: базальт – 2,6 %, лавобрекчия – 1,36 %, туф – 0,53% (нижняя граница для промышленно перерабатываемых руд 0,35 % Cu).

Задачей исследований являлось на основании экспериментальных данных выполнить моделирование и выбор регрессионных зависимостей для определения выхода концентрата электросепарации от двух переменных факторов: напряжения электростатического поля сепаратора $E, (кВ)$ и крупности измельченной медьсодержащей горной массы $X, (мм)$.

Общий объем статистических данных для каждого типа сырья составлял $n = 15$. Первоначальная оценка выполнялась методом построения парных корреляций $\gamma = f(X)$ и $\gamma = f(E)$ на предмет выявления и характера нелинейности. При этом установлено, что выход концентрата линейно связан с X , для параметра E также возможна линейная корреляция, хотя более точно эту связь аппроксимирует квадратичная парабола.

Экспериментальные данные табл.1 были трансформированы в вид, пригодный для моделирования, (табл.2), величина X определялась как среднее арифметическое граничных значений каждого узкого класса крупности.

Таблица 2 - Исходные данные для моделирования

$X, мм$	$E, кВ$	$E*X$	E^2	X^2	$X*E^2$	$E*X^2$	$\gamma, \%$ базальт	$\gamma, \%$ лавобр	$\gamma, \%$ туф
0,815	10	8,15	100	0,66	81,5	6,64	2,78	1,48	0,74
0,44	10	4,4	100	0,19	44	1,94	1,85	1,11	0,74
0,15	10	1,5	100	0,02	15	0,23	0,74	0,93	0,74
0,815	15	12,225	225	0,66	183,37	9,96	4,44	2,78	1,85
0,44	15	6,6	225	0,19	99	2,90	2,78	2,04	1,11
0,15	15	2,25	225	0,02	33,75	0,34	1,3	1,48	1,04
0,815	20	16,3	400	0,66	326	13,28	6,3	4,07	2,96
0,44	20	8,8	400	0,19	176	3,87	3,52	2,59	1,85
0,15	20	3	400	0,02	60	0,45	1,85	1,85	1,48
0,815	25	20,375	625	0,66	509,37	16,61	7,93	4,44	3,7
0,44	25	11	625	0,19	275	4,84	3,7	2,78	2,55
0,15	25	3,75	625	0,02	93,75	0,56	2,04	2,04	1,85
0,815	30	24,45	900	0,66	733,5	19,93	10,37	5,74	4,07
0,44	30	13,2	900	0,19	396	5,81	5,56	3,33	3,89
0,15	30	4,5	900	0,02	135	0,68	2,59	2,3	2,22

На первом этапе решалась задача попробовать получить единообразное для всех трех пород описание выхода концентрата от X и E - одинаковым уравнением, но с разными коэффициентами. Основанием являлось то, что все три породы не имеют резкой контрастности по физическим свойствам - плотности, магнитным и электрическим характеристикам.

Математическое моделирование выполнялось методом наименьших квадратов с использованием программы Microsoft Excel и стандартной процедуры «Сервис. Анализ данных. Регрессия». Точность задавалась на уровне 0,95.

Моделирование выполнялось в несколько этапов при изменении типа уравнения регрессии путем последовательного введения дополнительных слагаемых в виде линейных и квадратичных функций от X , E . Оценка адекватности модели – точности совпадения массивов экспериментальных и расчетных значений выхода концентрата - проводилась по величине квадрата коэффициента корреляции этих двух множеств - R^2 . Не приводя величин коэффициентов a_0, a_1, \dots исследованных уравнений, приведем полученные для них значения R^2 (табл.3).

Таблица 3 - Квадрат коэффициента корреляции R^2 для разных видов уравнения регрессии

№ п/п	Вид уравнения регрессии	R^2		
		Базальт	Лавобрекчия	Туф
1	$\gamma = a_0 + a_1X + a_2 E$	0,881	0,873	0,902
2	$\Gamma = a_0 + a_1X + a_2 E + a_3 E * X$	0,986	0,972	0,95791
3	$\gamma = a_0 + a_1X + a_2 E + a_3 E * X + a_4 E^2$	0,987	0,979	0,95793
4	$\gamma = a_0 + a_1X + a_2 E + a_3 E * X + a_4 E^2 + a_5 X^2$	0,9896	0,9857	0,9582
5	$\gamma = a_0 + a_1X + a_2 E + a_3 E * X + a_4 E^2 + a_5 X^2 + a_6 E^2 X$	0,9906	0,98575	0,967
6	$\gamma = a_0 + a_1X + a_2 E + a_3 E * X + a_4 E^2 + a_5 X^2 + a_6 E^2 X + a_7 X^2 E$	0,9941	0,9891	0,9798

Как видно из табл.3, для простейшей линейной модели 1 имеет место низкое значение R^2 . Введение дополнительного слагаемого в виде произведения независимых факторов $a_3 * E * X$ (уравнение 2, табл.3) дает существенное повышение R^2 для всех трех пород, однако для лавобрекчии и базальта величину R^2 желательно повысить. Введение дополнительного слагаемого $a_4 E^2$ (уравнение 3) практически не повлияло на R^2 для лавобрекчии и туфа. Введение слагаемого $a_5 X^2$ (уравнение 4) позволило повысить точность описания распределения выхода для базальта и лавобрекчии, но не повлияло на R^2 для туфа. Для туфа, фактически, все четыре уравнения № 2, 3, 4 и 5 имеют приблизительно одинаковую точность описания, R^2 около 0,96.

Для всех трех пород наиболее высокое значение R^2 дает уравнение 6, табл.3 в виде полной квадратичной формы:

$$\gamma = a_0 + a_1X + a_2 E + a_3 E * X + a_4 E^2 + a_5 X^2 + a_6 E^2 X + a_7 X^2 E \quad (1)$$

Как видно из табл.4 коэффициенты a_1 и a_5 имеют наиболее высокое

абсолютное значение. Из этого следует, что на выход концентрата более существенно влияет крупность частиц питания, чем напряжение поля на электродах в заданном диапазоне изменения параметров: $E = 10 \div 30$ кВ, $X = (-1+0,05)$ мм, что подтверждает и их анализ по t-критерию Стьюдента.

Таблица 4 - Коэффициенты регрессионного уравнения (1)

Тип породы	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
Базальт	-0,994	6,832	0,123	-0,262	-0,001	-6,14	0,007	0,424
Л/брекч.	-0,532	0,718	0,157	0,031	-0,002	-2,149	-0,001	0,206
Туф	2,47	-10,67	-0,165	0,848	0,004	6,632	-0,009	-0,350

Другие статистические оценки регрессии (1) - по множественному коэффициенту корреляции R , по R^2 , нормированному R^2 , критерию Фишера F также показывают, что уравнение имеет высокий уровень адекватности.

Однако уравнения вида (1) довольно громоздки и трудоемки для практического использования. Поэтому для построения более простых моделей использовали пакет программ расчета статистики SPSS [4].

Так же как и выше, для программы Excel, исходные данные брали из табл. 2 и далее в пакете программ SPSS использовали опции: Анализ. Регрессия. Линейная регрессия: метод - «Шаговый отбор», критерий: «Использовать вероятность F включение 0,05, исключение 0,1». При этом из уравнения регрессии (1) были отсеяны слагаемые с наименее значимыми коэффициентами. Доверительный интервал задавался на уровне 0,95.

В результате программа SPSS предложила две модели, из которых выбрана вторая - с более высокими значениями R^2 . Эта модель представлена следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 \text{-базальт:} \quad & \gamma = 0,552 + 0,234X \cdot E + 0,005X \cdot E^2, \quad R^2 = 0,988, \\
 \text{-лавобрекчия:} \quad & \gamma = 1,27 + 0,006X \cdot E^2, \quad R^2 = 0,936, \\
 \text{-туф:} \quad & \gamma = -0,011 + 0,064 E + 0,004X \cdot E^2, \quad R^2 = 0,944.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Как видим, уравнения (2) для лавобрекчии и туфа имеют недостаточно высокое значение $R^2 \approx 0,94$. Это дает основание вернуться к идее выбора единой функции для всех трех пород и из табл.3 выбрать уравнение с R^2 близким к 0,94. Наиболее подходящим является уравнение № 2 табл.3, имеющее вид:

$$\gamma = a_0 + a_1X + a_2 E + a_3 E \cdot X \tag{3}$$

Из табл. 5 видно, что коэффициент a_2 имеет наименьшее абсолютное значение. Это дает основание попробовать упростить уравнение (3) до вида:

$$\gamma = a_0 + a_1X + a_2 E \cdot X \tag{4}$$

Таблица 5 – Коэффициенты и R^2 уравнения (3) $\gamma = a_0 + a_1X + a_2 E + a_3 E * X$

Коэффициенты	Базальт	Лавобрекчия	Туф
A_0	0,423	0,666	-0,168
A_1	-1,637	-1,188	-0,958
A_2	0,006	0,026	0,069
A_3	0,434	0,210	0,138
R^2	0,9863	0,9720	0,9579

Таблица 6 – Коэффициенты и R^2 уравнения (4) $\gamma = a_0 + a_1X + a_2 E * X$

Коэффициенты	Базальт	Лавобрекчия	Туф
A_0	0,553	1,189	1,211
a_1	-1,844	-2,023	-3,159
a_2	0,444	0,252	0,248
R^2	0,9862	0,9668	

Сравнивая попарно R^2 в таблицах 5 и 6, можно видеть, что R^2 меняется мало для базальта и лавобрекчии, но для туфа снижается значительно, то есть для туфа упрощение уравнения (3) до вида (4) неприемлемо.

Очевидно, что для практического использования уравнений выхода концентрата для базальта и лавобрекчии следует сделать выбор в пользу простоты и единообразия описания, то есть выбрать уравнения (4), тогда как для туфа уравнение вида (3) имеет более высокую точность аппроксимации: для (3) $R^2=0,958$, для (2) $R^2=0,944$ и для (4) $R^2 = 0,91$. Причем, из табл. 3 видно, что для туфа дальнейшее усложнение уравнения вида (3) добавлением слагаемых повышает точность не существенно.

Учитывая это, для практического использования рекомендованы следующие зависимости:

$$\begin{aligned}
 \text{-базальт:} & \quad \gamma = 0,553 - 1,844X + 0,444 EX, \quad R^2 = 0,986, \\
 \text{-лавобрекчия:} & \quad \gamma = 1,189 - 2,023X + 0,252 EX, \quad R^2 = 0,967, \\
 \text{-туф:} & \quad \gamma = -0,168 - 0,958X + 0,069E + 0,138 EX, \quad R^2 = 0,958.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Абсолютное значение величин коэффициентов уравнения (5) подтверждает сделанный выше вывод, что в исследуемом диапазоне изменения параметров на выход концентрата больше влияет крупность питания, чем напряжение поля. Максимум выхода концентрата имеет место при наиболее высоких показателях крупности $X = (-1,0 + 0,63)$ мм и напряжения $E = 30$ кВ. Рациональные значения указанных показателей определятся по результатам дальнейшего исследования качества получаемого концентрата.

Выводы. По экспериментальным результатам электростатической

сепарации медьсодержащих пород базальтовых карьеров – базальт, туф, лавобрекчия – выполнено моделирование и установлены регрессионные зависимости аппроксимирующие связь выхода концентрата электросепарации с крупностью питания X в диапазоне $-1+0,05$ мм и с напряжением поля на электродах E в диапазоне $10\div 30$ кВ.

Для практического использования рекомендованы регрессионные уравнения:

$$\text{-базальт: } \gamma = 0,553 - 1,844X + 0,444 EX, \quad R^2 = 0,986,$$

$$\text{-лавобрекчия: } \gamma = 1,189 - 2,023X + 0,252 EX, \quad R^2 = 0,967,$$

$$\text{-туф: } \gamma = -0,168 - 0,958X + 0,069E + 0,138 EX, \quad R^2 = 0,958.$$

Величина R^2 - не ниже 0,96 указывает на высокий уровень адекватности полученных моделей. В заданном диапазоне изменения параметров на выход концентрата в большей мере влияет крупность частиц питания, чем напряжение поля. Максимум выхода имеет место при наиболее высоких показателях крупности $X = (-1,0 + 0,63)$ мм и напряжения поля $E = 30$ кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы развития медной промышленности в Украине [Электронный ресурс].- Режим доступа: http://www.metalindex.ru/publications/publications_1145.html?template=23
2. Булат, А.Ф. Перспективы комплексной переработки базальтового сырья Волыни / А.Ф.Булат, В.П.Надуть, З.Р. Маланчук // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск, 2010. – Вып. 85. – С. 3-7.
3. Булат, А.Ф. Результаты исследования эффективности использования электрического поля для получения медного концентрата из базальта / А.Ф.Булат, В.П. Надуть, Е.З. Маланчук // Геотехнічна механіка : Міжгалуз. зб. наук. праць / ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ, 2014. – Вип. 119. – С. 3-11.
4. Бююль, А. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей / А. Бююль, П. Цефель П.: Пер. с нем. – СПб.: ООО «Диа-СофтЮП», 2005. – 608 с.

REFERENCES

1. «Prospects for the development of the copper industry in Ukraine [Electronic resource]», available at: http://www.metalindex.ru/publications/publications_1145.html?template=23.
2. Bulat, A.F, Naduty, V.P. and Malanchuk, Z.R. (2010), “Prospects for complex processing of raw basalts of Volyn”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 85, pp. 3-7.
3. Bulat, A.F, Naduty, V.P. and Malanchuk, Z.R. (2014), “Results of the study of the effectiveness Using electric fields to obtaining copper concentrate from the basalt rock“, *Geo-Technical Mechanics*, no. 119, pp. 3-11.
4. Bühl, A. and Zöfel, P. (2005), *SPPS: Iskusstvo obrabotki informatsii. Analiz statisticheskikh dannykh I vosstanovleniye skrytykh zakonornostey*. [SPSS Version 10. Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows], DiaSoft, Sankt-Petersburg:, RU.

Об авторах

Надуть Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, nadutyvp@yandex.ua.

Чельшикіна Валентина Васильевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, iron_ore@mail.ru.

Маланчук Евгений Зиновьевич, кандидат технических наук, доцент Национального университета водного хозяйства и природопользования (г. Ровно, Украина), докторант Института геотехнической механики НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина

About the authors

Nadutyu Vladimir Petrovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.C. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, nadutyvp@yandex.ua.

Chelyshkina Valentina Vasilievna, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, iron_ore@mail.ru.

Malanchuk Evgenij Zinovievich, Ph.D. (Tech.), associate professor of National University of Water Resources and Environmental Management (Rovno, Ukraine), doctoral candidate of M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine

Анотація. Базальтові родовища Рівненської та Житомирської областей України містять самородну мідь, оксиди і карбонати міді, самородне залізо і титаномагнетит в обсягах, що представляють промисловий інтерес. Тому актуальна розробка комплексної технології переробки базальтової сировини, яка забезпечить не тільки виробництво нерудних будматеріалів, але й вилучення міді, заліза, титану. При розробці такої технології нами досліджувався процес електросепарації базальту, туфу і лавобрекчії, основних порід, що містять мідь. На підставі експериментальних даних нами були встановлені залежності та розроблено узагальнену регресійну модель для визначення виходу концентрату електросепарації при зміні крупності живлення сепаратора в діапазоні $-1,0 + 0,05$ мм і напруги поля на електродах $10 \div 30$ кВ. Отримані результати вказують на доцільність використання електросепарації в комплексній технології переробки порід базальтових родовищ Волині і дозволяють прогнозувати вихід концентрату при електросепарації базальту, туфу та лавобрекчії.

Ключові слова: електростатична сепарація, вихід концентрату, базальт, туф, лавобрекчія.

Abstract. Basalt deposits of Rovno and Zhytomyr regions of the Ukraine contain native copper, oxides and carbonates of copper, native iron and titanomagnetite in the volumes which represent commercial interest. Therefore, it is very actual to develop the complex technology of processing of raw materials of basalt, this technology will provide not only the production of non-metallic building materials, but also will provide extract of copper, iron, titanium. In the development of this technology we studied the process of electric separation of the main copper-bearing rocks - basalt, tuff and lava-brecchia. On the basis of experimental data have been found the dependences and developed the generalized regression models for determination of the product output of the electric separation process concentrate by changing size separator supply in the range $-1.0 + 0.05$ mm and a field voltage across the electrodes $10 \div 30$ kW. The obtained results indicate the feasibility of using electric separation in the complex technology of processing basalt rock deposits of Volyn and allow to predict concentrate output at electric separation of basalt, tuff and lava-brecchia.

Keywords: electric separation, yield of the concentrate, basalt, tuff, lava-brecchia.

Статья поступила в редакцию 20.01.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом