

А.Ф. Булат, Е.З. Маланчук, В.П. Надутый

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОРОДЫ БАЗАЛЬТОВОГО СЫРЬЯ

*По результатам лабораторных исследований установлены предпочтительные классы крупности в процессе рудоподготовки и классификации составляющих базальтовой горной массы к электросепарации, а также зависимости выхода медного концентрата для базальта, туфа и лавобрекчии от напряженности электрического поля при варьировании содержанием разных классов крупности в исходном продукте.*

---

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ НА ПОРОДИ БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ

*За результатами лабораторних досліджень встановлено переважні класи крупності в процесі рудопідготовки і класифікації складових базальтової гірничої маси до електро-сепарації, а також залежності виходу мідного концентрату для базальту, туфу і лавобрекчії від напруженості електричного поля при варіюванні вмістом різних класів крупності в вихідному продукті.*

---

### RESEARCH OF ELECTROSTATIC FIELD INFLUENCE ON ROCKS OF BASALT RAW MATERIAL

*According to the results of laboratory studies were set preferred size classes in process of ore preparation and classification of components of basalt rock mass to electroseparation, and also dependences of output of copper concentrate for basalt, tuff and breccias of electric field at varying content of different fractions in the source product.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Для разделения минералов по электропроводности широкое промышленное применение получили коронно-электростатические сепараторы системы ЭКС-1250 и ЭКС-3000, освоенные заводами горного оборудования, а также сепараторы многосекционного типа ЭКС-1000 и ЭКС-2000. К числу преимуществ электрических методов переработки горной массы относятся их экономичность, возможность разделения металлической и силикатной частей в сухой горной массе, высокая технологическая эффективность и вероят-

ность полной автоматизации, поскольку процессы электронно-ионной технологии поддаются тонкому регулированию. Современные быстрые режимы сепарации основаны на кинетике зарядки и разрядки минералов в поле коронного разряда [1, 2]. К настоящему времени достаточно широко исследованы закономерности группового движения заряженных частиц в изменяющемся электрическом поле барабанных сепараторов, что позволило увеличить их производительность до 3,0 т/ч на погонный метр длины электрода. Детально изучены режимные характеристики, в частности, влияние влажности на процесс электросепарации, разработаны технологические

решения по ее использованию в различных точках схемы цепи аппаратов [1 – 3].

Изученность вопроса и практика использования электросепарации для немагнитных материалов позволяет считать целесообразным ее применение для отделения самородной меди из продуктов базальтового месторождения. При этом магнитная часть концентрата (железо, титан) эффективно извлекается на магнитном сепараторе, а самородная медь может быть извлечена на электрическом сепараторе. Учитывая, что во всех трех породах базальтового месторождения кроме крупных включений самородной меди содержится значительное ее количество в виде точечных включений, которые могут успешно извлекаться на электрическом сепараторе. Для этого необходимо определить рациональную крупность переработки, влияние сроков на процент извлечения и установить минимально допустимую крупность в процессе рудоподготовки. Кроме того, целью исследований является определение величины напряжения электрического поля для обеспечения максимального извлечения меди минимальной крупности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Прежде чем использовать электростатические сепараторы в экспериментальной технологической схеме комплексной переработки базальтового сырья необходимо предварительное определение зависимости количества концентрата, извлекаемого на электросепараторе из базальта, лавобрекчии и туфа, от напряжения электрического поля для обеспечения максимального выхода концентрата и извлечения меди. При этом не ставилась задача выбора наиболее эффективного сепаратора, а для решения задач были проведены лабораторные исследования электросепарации указанных материалов на электросепараторе ПС-1 лабораторного типа. При этом навески весом 2,5 – 3,0 кг измельченной горной массы каждого типа крупностью менее 1,0 мм пропускали

через электросепаратор. При выполнении экспериментов использовался материал всех трех составляющих базальтового сырья, из которых на магнитном сепараторе предварительно была выделена магнитно-восприимчивая часть. На электросепаратор подавались хвосты магнитной сепарации, то есть немагнитная фракция. На электросепараторе эта фракция разделялась на три продукта: концентрат – электропроводящая часть, промпродукт – полупроводящая часть и хвосты – непроводящая часть. Среднестатистические результаты экспериментов приведены в табл. 1. В табл. 2 и 3 приведены интерпретация данных табл. 1 и вид, удобный для анализа результатов.

Минералогический анализ результатов исследований показал, что в непроводящей части продукта сепарации содержатся в основном кварц и другие силикаты; в полупроводниковом продукте имеются сростки силикатов, железа и меди, а в проводниковой фракции – измельченные частицы самородной меди и сростки железа [4].

Отметим особенности электросепарации базальта (табл. 2). При относительно высокой крупности питания ( $-1 +0,63$  мм) базальт не дает отходов (хвостов). Этот класс крупности практически полностью (91%) извлекается в концентрат. Более мелкий класс базальта ( $-0,63 +0,25$  мм) дает очень мало концентрата, лишь 4,5% от исходного, то есть 78% массы этого класса уходит в хвосты. Такая картина плохо согласуется с текстурно-структурным распределением меди в базальте и физикой разделения на электросепараторе, поэтому далее для базальта анализируем более широкий, объединяющий оба этих узких класса, диапазон крупности питания ( $-1 +0,25$  мм).

Для указанных классов выход медного концентрата от исходного питания для базальта и лавобрекчии одинаков (около 14%), для туфа – примерно вдвое меньше (6,7%). Наибольший выход хвостов получается из туфа (35%), несколько меньше, но близкое значение дают базальт (25,5%) и лавобрекчия (23,3%). Отсюда следует, что меньше всего меди было в пробе туфа.

Количество концентрата для лавобрекчии явно могло бы быть больше, если бы не высокий выход промпродукта, кстати, самый высокий из трех пород. То есть, для лавобрекчии недостаточно раскрытие и явно нужна меньшая крупность питания. То же касается и туфа, где промпродукта получилось даже больше, чем концентрата.

Лишь для базальта количество промпродукта технологически приемлемо.

По данным табл. 2 были рассчитаны выхода продуктов в операции электросепарация (табл. 3), то есть не от всей исходной пробы, как в табл. 2, а от 100% питания электросепаратора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОСЕПАРАЦИИ БАЗАЛЬТОВОГО СЫРЬЯ (ПРИБОР ПС-1)

Таблица 1

Тип породы	Классы крупности, мм	Магнитная сепарация пробы				Электросепарация немагнитной фракции						Всего масса пробы
		магнитная фракция		немагнитная фракция		концентрат – проводниковая часть		промпродукт – полупроводниковая		хвосты – непроводящая часть		
		г	%	г	%	г	%	г	%	г	%	
Базальт	-1+0,63	370	63,8	210	36,2	190,2	32,8	19,7	3,4	0,0	0,0	580
Базальт	-0,63 +0,25	740	67,3	360	32,7	49,5	4,5	29,7	2,7	280,5	25,5	1100
Лавобрекчия	-0,63 +0,25	220	51,2	210	48,8	60,2	14,0	49,9	11,6	100,2	23,3	430
Туф	-0,63 +0,25	29	48,3	31	51,7	4,02	6,7	6,0	10,0	21,0	35,0	60

ПОКАЗАТЕЛИ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ И ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОСЕПАРАЦИИ ХВОСТОВ МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Таблица 2

Тип породы	Классы крупности, мм	Выход продуктов от исходного, %				
		Магнитная сепарация пробы		Электросепарация немагнитной фракции		
		магнитная фракция	немагнитная фракция	концентрат	промпродукт	хвосты
Базальт	-1 +0,63	63,8	36,2	32,8	3,4	0,0
Базальт	-0,63 +0,25	67,3	32,7	4,5	2,7	25,5
Базальт	-1 +0,25	66,1	33,9	14,3	2,1	25,5
Лавобрекчия	-0,63 +0,25	51,2	48,8	14,0	11,6	23,3
Туф	-0,63 +0,25	48,3	51,7	6,7	10,0	35,0

ВЫХОД ПРОДУКТОВ В ОПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОСЕПАРАЦИИ

Таблица 3

Тип породы	Классы крупности, мм	Выход в операции электросепарации, %		
		концентрат	промпродукт	хвосты
Базальт	-1 +0,25	42,1	8,6	49,3
Лавобрекчия	-0,63 +0,25	28,7	23,8	47,7
Туф	-0,63 +0,25	13,0	19,4	67,7

По данным табл. 3 проведем последовательный анализ продуктов, полученных в операции (т.е. от 100% питания):

– выход концентрата составил для ба-

зальта 42,1%, для брекчии 28,7%, для туфа 13,0%;

– выход хвостов из туфа составляет примерно 68% от питания, тогда как из

брекчии и базальта примерно на 20% меньше, 48 и 49,3% соответственно;

– выход промпродукта самый низкий у базальта – 8,6%, против 19,4% для туфа и 23,8% для брекчии.

Для лавобрекчии выход концентрата несколько выше, чем выход промпродукта (28,7 против 23,8%). Очевидно, что количество концентрата можно увеличить за счет снижения выхода промпродукта.

Для туфа, наоборот, выход промпродукта больше, чем выход концентрата (19,4% против 13,0%), причем, количество хвостов наибольшее по сравнению с остальными породами. Это говорит о наиболее низком (из трех пород) содержании меди в туфе, а также о ее более тонкой вкрапленности, что стимулирует высокий выход промпродукта.

Эти результаты показывают, что для базальта эффективность электросепарации наиболее высокая, хотя питание было несколько большей крупности. Разница в показателях в данном случае вызвана не столько разной крупностью питания для базальта и остальных пород (тем более, что она не столь значительна), сколько разным содержанием меди в исходном питании. Это подтверждает приведенный ниже оценочный расчет качества медного концентрата.

Для расчета качества используем приведенные в табл. 2 цифры выхода медного концентрата (от исходного) и зададимся извлечением медного концентрата: 80% от исходного. Это – высокая цифра, но в данном случае не принципиальная. Можно взять 75 или 70% – качество немного уменьшится, но общая картина сохранится. Возьмем показатель содержания меди в исходных пробах из табл. 4,5 – 4,10 раздела 4 и используем формулу, полученную из определения извлечения [5]  $\beta = \varepsilon \cdot \alpha / \gamma$ .

Качество медного концентрата электросепарации составит:

- для лавобрекчии  $\beta = 80 \cdot 1,36 / 14 = 7,8\%$ ;
- для базальта  $\beta = 80 \cdot 2,62 / 14,3 = 14,7\%$ ;
- для туфа  $\beta = 80 \cdot 0,53 / 6,7 = 6,3\%$ .

Проведенный расчет показывает, что наиболее богатый концентрат получается при электросепарации базальта, далее в порядке убывания следуют лавобрекчия и туф. Эти две породы дали более бедный концентрат не только из-за меньшего содержания меди в исходном, но и из-за высокого выхода промпродукта, с которым уходит (теряется) много меди. Например, для туфа выход промпродукта выше, чем выход концентрата. Промпродукт всегда беднее концентрата, но поскольку его много, то с ним теряется много меди. В результате концентрат получается бедным. То есть, необходимо снижать выход промпродукта для лавобрекчии и туфа, что достигается уменьшением крупности питания, а также использовать более мощные электросепараторы.

Поскольку за базовое предприятие при исследованиях принят один из крупных базальтовых карьеров, пробы пород которого анализировались, то для отработки технологии комплексной безотходной переработки сырья необходимо создание научно-производственного участка с производительностью 6 – 10 т/ч по каждому из трех видов сырья. Для этих условий перспективны следующие коронно-электростатические сепараторы: СЭ-25/150 производительностью 0,5 т/ч на 1 м длины осадительного электрода, СЭ-70/100 производительностью 2,5 – 6 т/ч или аналогичные сепараторы зарубежных фирм: «Карпко», «Рапид», «Лурги» (крупность питания 80% класса минус 0,074 мм), а также сепараторы ЭКС-1250 (производительность от 2 т/ч), СЭС-2000 (производительность до 8,5 т/ч), работающие на крупности питания 0,3 – 0,074 мм.

В целом, можно сделать вывод о целесообразности использования электросепарации в технологической схеме переработки базальтового сырья. Для всех трех меденосных пород Рафаловского карьера возможность повышения качества концентрата электросепарации состоит в снижении крупности питания, а также в применении перечисленных операций.

Однако для использования электростатического сепаратора в экспериментальной технологической схеме комплексной переработки базальтового сырья возникает необходимость определения количества извлечения самородной меди из базальта, лавобрекчии и туфа в зависимости от напряжения электрического разряда и от крупности подаваемого материала. При этом в эксперименте использовался материал всех трех составляющих базальта, из которых на магнитном сепараторе выделена магнитновосприимчивая часть. Поэтому на электрический сепаратор в процессе экспериментов подавалась сыпучая масса, содержащая проводниковую часть (самородную медь), полупроводниковую (сростки) и непроводящую часть в виде силикатов, то есть та

часть сыпучей горной массы, которая отделилась на магнитном сепараторе как немагнитная (промпродукт для электросепарации). Исследования проведены с изменением напряженности электрического поля сепаратора в диапазоне 10 – 30 кВт при крупности пород классов  $-1,0 +0,63$  мм,  $-0,63 +0,25$  мм и  $-0,25 +0,05$  мм. В каждом эксперименте использовалась навеска в 27 г каждого класса крупности и фиксировалось извлечение концентрата в граммах при напряженности электрического поля 10, 15, 20, 25 и 30 кВт. Результаты эксперимента представлены накопленным итогом по мере увеличения напряженности. По полученным данным был вычислен выход концентрата  $Q$ , %. В табл. 4 приведены результаты экспериментов по каждой породе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КОНЦЕНТРАТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ  
НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Таблица 4

Крупность, мм	Выход концентрата	Напряжение поля, кВт				
		10	15	20	25	30
Базальт, проба 2700 г						
$-1,0 +0,63$	г	75	120	170	205	280
	%	2,778	4,444	6,296	7,93	10,370
$-0,63 +0,25$	г	50	75	95	100	150
	%	1,852	2,778	3,519	3,704	5,556
$-0,25 +0,05$	г	20	35	50	55	70
	%	0,741	1,296	1,852	2,037	2,593
Лавобрекчия, проба 2700 г						
$-1,0 +0,63$	г	40	75	110	120	155
	%	1,481	2,778	4,074	4,444	5,741
$-0,63 +0,25$	г	30	55	70	75	90
	%	1,111	2,037	2,593	2,778	3,333
$-0,25 +0,05$	г	25	40	50	55	62
	%	0,926	1,481	1,852	2,037	2,296
Туф, проба 2700 г						
$-1,0 +0,63$	г	20	50	80	100	110
	%	0,741	1,852	2,963	3,704	4,074
$-0,63 +0,25$	г	20	30	50	70	105
	%	0,741	1,111	1,852	2,593	3,889
$-0,25 +0,05$	г	20	28	40	50	60
	%	0,741	1,037	1,481	1,852	2,222

Для исследуемых трех пород по каждому классу крупности были получены парные линейные уравнения регрессии зависимости выхода концентрата  $Q$  от на-

пряженности электрического поля сепаратора  $E$ . Результаты расчетов по базальту приведены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что коэффициенты де-

терминации  $R^2$  полученных моделей близки к предельному значению 1,0, что свидетельствует о сильном влиянии факторного признака на результативный. Большое значение статистики Фишера  $F$  существенно превышает критическое ( $F_{кр} = 10,13$ ) при уровне значимости 0,05, что свидетельствует об

адекватности парной линейной модели. Статистика Стьюдента  $t_B$  коэффициента при факторном признаке также существенно превышает критическое значение ( $t_{кр} = 3,18$ ), что является подтверждением значимости этого коэффициента в регрессионной модели при уровне значимости 0,05.

**КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДА КОНЦЕНТРАТА ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ ПО БАЗАЛЬТУ**

Таблица 5

Крупность, мм	Уравнение регрессии	$R^2$	$F$	$t_B$
-1,0 +0,63	$Q = -1,037 + 0,367 E$	0,986	211,5	14,54
-0,63 +0,25	$Q = 0,148 + 0,167 E$	0,925	37,27	6,105
-0,25 +0,05	$Q = -0,074 + 0,089 E$	0,980	144,0	12,00

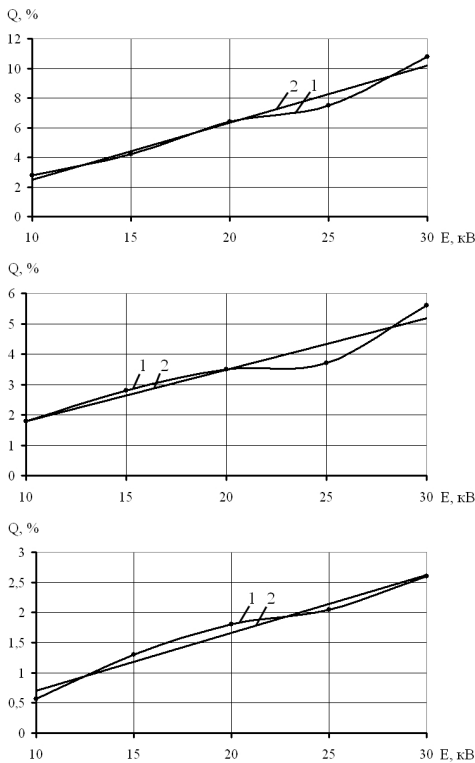


Рис. 1. Зависимость экспериментального (1) и расчетного (2) выхода концентрата от напряженности поля для базальта

Графическое представление экспериментальных и расчетных данных для ба-

зальта разных классов крупности приведено на рис. 1.

Практически, на сепараторе ведется переработка горной массы, в которой все классы крупности находятся вместе в некотором соотношении. Интерес исследования представляет влияние соотношения между разными классами на выход концентрата. Обозначим  $d_i$  – доля в смеси  $i$ -го класса крупности, где  $i = 1, 2, 3$ . Предполагаем, что  $d_1$  соответствует классу -1,0 +0,63 мм;  $d_2$  и  $d_3$  соответствуют следующим по порядку классам. При этом  $\sum d_i = 1$ . Примем для определенности соотношение  $d_2/d_3 = 1,5$ . Задавшись для первого класса  $d_1 = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ , для остальных классов получим  $d_3(1 - d_1)/2,5; d_2 = d_3 = 1,5$ .

С учетом соотношения классов крупности в пробе для определения выхода концентрата, получим следующую модель:

$$Q = -1,037d_1 + 0,148d_2 - 0,074d_3 + (0,367d_1 + 0,167d_2 + 0,089d_3) \cdot E \quad (1)$$

Результаты расчета выхода концентрата при разных значениях долей классов крупности в зависимости от напряженности электрического поля представлены в табл. 6, а графическое представление при варьировании первого класса ( $d_1$ ) приведены на рис. 2.

Доля концентрата в пробе			Базальт. Выход концентрата $Q$ , %				
$d_1$	$d_2$	$d_3$	Напряженность электрического поля $E$ , кВ				
			10	15	20	25	30
0,4	0,36	0,24	1,90	3,04	4,18	5,32	6,46
0,5	0,30	0,20	2,02	3,27	4,53	5,78	7,04
0,6	0,24	0,16	2,14	3,51	4,88	6,25	7,62
0,7	0,18	0,12	2,26	3,75	5,23	6,72	8,21
0,8	0,12	0,08	2,38	3,98	5,59	7,19	8,79

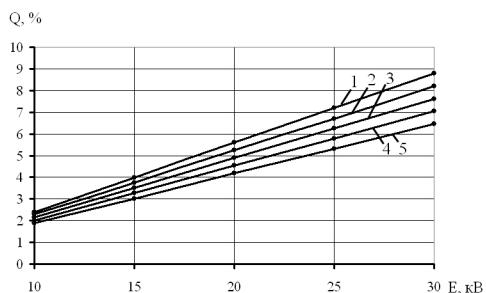


Рис. 2. Зависимость выхода концентрата от напряженности электрического поля при варьировании содержанием разных классов крупности для базальта: 1 –  $d_1 = 0,4$ ; 2 –  $d_1 = 0,5$ ; 3 –  $d_1 = 0,6$ ; 4 –  $d_1 = 0,7$ ; 5 –  $d_1 = 0,8$

Из рис. 2 видно, что при низкой напряженности электрического поля долевой состав крупности в пробе мало влияет на величину выхода концентрата, что объясняется низкой эффективностью извлечения при  $E = 10$  кВ. По мере роста напряженности поля различные классы крупности ведут себя по-разному. Поэтому при увеличении  $d_1$  от 0,4 до 0,8 выход концентрата возрастает, и при  $E = 30$  кВ разница на выходе составляет 36% ( $8,796/6,461 = 1,36$ ). Таким образом, если в потоке горной массы много переизмельченной породы, то

это приводит к снижению эффективности процесса извлечения медного концентрата из горной породы.

## ВЫВОДЫ

1. Показана эффективность использования процесса электросепарации для отделения медного концентрата от измельченной массы базальта, лавобрекчии и туфа после их предварительной магнитной сепарации для отделения титаномагнетита.

2. Установлены предпочтительные классы крупности в процессе рудоподготовки и классификации составляющих базальтовой горной массы к электросепарации.

3. Установлены зависимости выхода медного концентрата для базальта, туфа и лавобрекчии от напряженности электрического поля при варьировании содержанием разных классов крупности в исходном продукте.

4. Получены регрессионные зависимости выхода медного концентрата от различных соотношений между классами крупности в исходном продукте и от напряженности электрического поля.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олофинский Н.Ф. Электрический методы обогащения полезных ископаемых / Н.Ф. Олофинский. – М.: Недра, 1977. – 199 с.

2. Карнаухов Н.М. Технология доводки коллективных концентратов с помощью электрической сепарации / Н.М. Карнаухов. – М.: Недра, 1966. – 120 с.

3. Самыгин В.Д. Основы обогащения: уч. пособие для вузов / В.Д. Самыгин, Л.О. Филимонов, Д.В. Шехирев. – М.: Альтекс, 2003. – 240 с.

4. Надутый В.П. Определение эффективности использования электростатического поля при комплексной переработке базальтового сырья / В.П. Надутый, Е.З. Маланчук, Т.Ю. Гринюк // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Д., 2012. – Вып. 101. – С. 291 – 295.

5. Надутый В.П. Техническое предложение по реализации технологической схемы комплексной переработки

базальтовой горной массы с извлечением самородной меди / В.П. Надутый, Е.З. Маланчук, Т.Ю. Гринюк // ИГТМ НАН Украины, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. – Днепропетровск-Ровно, 2008. – 15 с.

## ОБ АВТОРАХ

Булат Анатолий Федорович – д.т.н., профессор, академик-секретарь отделения механики НАНУ, директор Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Маланчук Евгений Зиновьевич – к.т.н., доцент Национального университета водного хозяйства и природопользования (г. Ровно).

Надутый Владимир Петрович – д.т.н., профессор, заведующий отделом Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.