

УДК 622.777:621.928.7

Надутый В.П., д-р техн. наук, профессор
(ИГТМ НАН Украины),

Маланчук Е.З., канд. техн. наук, доцент
(Национальный университет водного хозяйства
и природопользования),

Эрперт А.М., канд. техн. наук, профессор
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДА КОНЦЕНТРАТА
САМОРОДНОЙ МЕДИ ИЗ БАЗАЛЬТОВОГО СЫРЬЯ ОТ
НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И КЛАССОВ
КРУПНОСТИ**

Надутый В.П., д-р техн. наук, профессор
(ИГТМ НАН України),

Маланчук Є.З., канд. техн. наук, доцент
(Національний університет водного господарства
та природокористування),

Ерперт О.М., канд. техн. наук, професор
(Державний ВНЗ «НГУ»)

**ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВИХОДУ КОНЦЕНТРАТУ
САМОРОДНОЇ МІДИ З БАЗАЛЬТОВОЇ СИРОВИНИ ВІД
НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ І КЛАСІВ КРУПНОСТІ**

Naduty V.P., D.Sc. (Tech.), Professor
(IGTM NAS of Ukraine),

Malanchuk Ye. Z., Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(National University of Water Management
and Nature Resources Use),

Erpert A.M., Ph.D. (Tech.), Professor
(State HEI "NMU")

**FINDING OF INTERDEPENDENCE BETWEEN YIELD OF NATIVE
COPPER CONCENTRATE MADE OF BASALT INPUT AND ELECTRIC
FIELD INTENSITY AND SIZE GRADES**

Аннотация. В работе представлены результаты исследований влияния электрического поля на процесс извлечения магнитовосприимчивой меди из базальтового сырья, состоящего из трех пород: базальта, туфа и лавобрекчии. Все три составляющие содержат в разном процентном отношении самородную медь, но в достаточном количестве для рационального извлечения. В статье решена актуальная задача доказательства эффективности использования электросепарации на конечной стадии комплексной переработки базальтового сырья. Предметом исследования являлись зависимости количества извлеченного медного концентрата от напряженности электрического поля сепаратора и от крупности подаваемой на него горной массы. На основании выполненного комплекса исследований проведен корреляционный анализ зависимостей выхода концентрата самородной меди от напряженности электрического

поля и соотношения классов крупности в исследуемых пробах трех горных пород и получены регрессионные модели для оценки количественного выхода концентрата.

Таким образом, обоснована целесообразность использования электросепарации на конечной стадии комплексной переработки базальтового сырья.

Ключевые слова: базальт, туф, лавобрекчия, самородная медь, электросепарация.

В процессе исследований базальт рассматривался не как материал для строительства, а как рудоносная горная порода, содержащая ценные металлы в виде титана, железа и самородной меди. Именно их содержание привлекло внимание исследователей. В результате получено процентное содержание полезных металлов не только в базальте, но и в сопутствующих ему в месторождении лавобрекчии и туфе [1]. Причем, если при добыче базальта открытым способом для нужд строительства лавобрекчия и туф не используются, а отправляются в отвал, то по результатам выполненных исследований они являются ценным металлосодержащим сырьем [1, 2]. Теперь возникает целесообразность комплексной безотходной технологии переработки базальта и техногенных отходов (лавобрекчии и туфа) с целью получения ценных металлов и силикатной части для различных отраслей промышленности [1]. При таком подходе существенно изменяется процесс рудоподготовки всех трех видов базальтового сырья. В процессе предварительных исследований рассмотрены особенности процессов дробления, измельчения [3], мелкой и тонкой классификации до уровня раскрытия металлов и возможности их отделения на магнитных сепараторах (для отделения самородной меди) [6]. Предыдущими исследованиями установлена возможность использования указанного оборудования в технологической схеме комплексной переработки базальтового сырья.

Актуальность данной работы заключается в необходимости определения при использовании электросепарации количества извлеченной самородной меди из базальта, туфа и лавобрекчии в зависимости от напряженности электрического поля сепаратора и от крупности подаваемой горной массы.

В соответствии с принятой методикой в экспериментах использовался материал всех трех составляющих базальтового месторождения, из которых на магнитном сепараторе предварительно выделена магнитовосприимчивая часть. В результате на электрический сепаратор в процессе экспериментов подавалась та часть сыпучей горной массы, которая отделилась на магнитном сепараторе как немагнитная (промпродукт для электросепарации), то есть сыпучая масса, содержащая проводниковую часть (самородную медь), полупроводниковую (сростки) и непроводящую часть в виде силикатов. Исследования проведены с изменением напряженности электрического поля сепаратора в диапазоне 10÷30 кВ при расसेве пород по следующим классам крупности $-1,0 +0,63$ мм, $-0,63 +0,25$ мм и $-0,25 +0,05$ мм. В эксперименте использовалась навеска 2700 г каждого класса крупности, и фиксировалось извлечение концентрата в граммах при напряженности электрического поля 10, 15, 20, 25, 30 (кВ). Результаты эксперимента представлены накопленным итогом по мере увеличения напряженности. По полученным данным был вычислен выход концентрата (Q , %). В табл. 1 приведены исходные экспериментальные результаты по каждой породе.

Из табл. 1 видно, что для всех узких классов крупности базальта, лавобрекчии и туфа выход концентрата увеличивается с повышением напряженности электрического поля.

Таблица 1 – Результаты определения выхода концентрата при изменении напряженности электрического поля

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

Для того, чтобы оценить степень влияния напряженности, преобразуем табл. 1 в вид, более удобный для анализа (табл. 2).

Как видно из табл. 2, и при 10 кВ, и при 15 кВ, и при 30 кВ наибольший выход концентрата получается из базальта. Далее, в порядке убывания, следуют лавобрекчия и туф. Всего по классам -1 +0,05 мм из базальта получено 57,75 % концентрата, из лавобрекчии 38,96, а из туфа 30,85 %. Это говорит лишь о том, что базальт имел самое высокое содержание меди в исходном, лавобрекчия и туф – беднее по меди, а наиболее бедным был туф.

Для того чтобы определить, насколько сильно влияет увеличение напряженности электрического поля на выход концентрата, за единицу приняли выход при 10 кВ и пересчитали выхода при других напряженностях относительно значения выхода при 10 кВ. По этим данным построен график на рис. 1, где по оси у отложены относительные единицы выхода.

Таблица 2 – Выход концентрата электросепарации при разной напряженности электрического поля

Крупность, мм	Выход концентрата	Напряженность электрического 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
Всего	%	5,37	8,52	11,67	13,67	18,52
Итого выход классов -1,0 +0,05 мм в концентрат, %		57,75				
Выход отн. 10 кВ	ед.	1,00	1,59	2,17	2,55	3,45
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
Всего	%	3,52	6,30	8,52	9,26	11,37
Итого выход классов -1+0,05 мм в концентрат, %		38,96				
Выход отн. 10 кВ	ед.	1,00	1,79	2,42	2,63	3,23
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
Всего	%	2,22	4,00	6,30	8,15	10,19
Итого выход классов -1+0,05 мм в концентрат, %		30,85				
Выход отн. 10 кВ	ед.	1,00	1,80	2,83	3,67	4,58

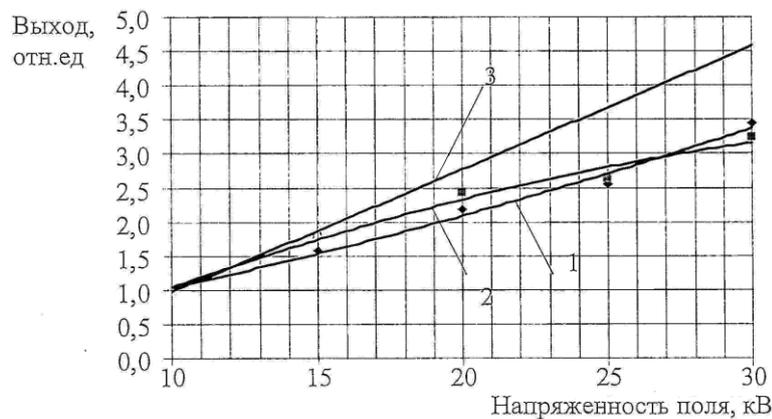


Рисунок 1 – Оценка влияния повышения напряженности электрического поля электросепаратора на увеличение выхода концентрата из базальта (1), лавобрекчии (2) и туфа (3) при крупности питания -1 +0,05 мм

Полученные зависимости показывают, что увеличение напряженности электрического поля в три раза (с 10 кВ до 30 кВ) ведет к увеличению выхода концентрата для базальта и лавобрекчии, примерно, в 3 раза, для туфа – в 4,5 раз. Более сильное влияние напряженности электрического поля на туф, возможно, связано с более тонкой и более равномерной вкрапленностью меди. Из-за этого увеличение напряженности поля ведет к увеличению извлечения вместе с ме-

дью большего количества породы, вследствие чего возрастает и выход концентрата.

Однако в диапазоне напряжений, применяемых для промышленных серийных сепараторов типа СЭ, повышение напряженности с 20 кВ до 30 кВ увеличивает абсолютный выход концентрата (широкого класса крупности $-1+0,05$ мм) не столь значительно: концентрата из базальта на $18,52 - 11,65 = 6,85$ %, из лавобрекчии на $11,37 - 8,52 = 2,85$ %, из туфа на 3,89 %. Очевидно, что в указанном широком классе крупности присутствуют узкие классы, лучше извлекаемые на электросепараторе.

Для дальнейшего анализа оптимальной крупности питания электросепарации привлекались методы корреляционного анализа. При этом определялась зависимость выхода концентрата от напряженности электрического поля и соотношения классов крупности в исходной массе.

Для исследуемых трех пород по каждому классу крупности были получены парные линейные уравнения регрессии зависимости выхода концентрата Q от напряженности электрического поля сепаратора E . Результаты расчетов по базальту приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Корреляционный анализ зависимости выхода концентрата от напряженности поля по базальту

Крупность, мм	Уравнение регрессии	R^2	F	t_b
$-1,0 + 0,63$	$Q = -1,037 + 0,367E$	0,986	211,5	14,54
$-0,63 + 0,25$	$Q = 0,148 + 0,167E$	0,925	37,27	6,105
$-0,25 + 0,05$	$Q = -0,074 + 0,089E$	0,98	144,0	12,0

Из таблицы видно, что коэффициенты детерминации 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 факторе признака также существенно превышает критическое значение ($t_{кр} = 3,18$), что является подтверждением значимости этого коэффициента в регрессионной модели при уровне значимости 0,05.

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:

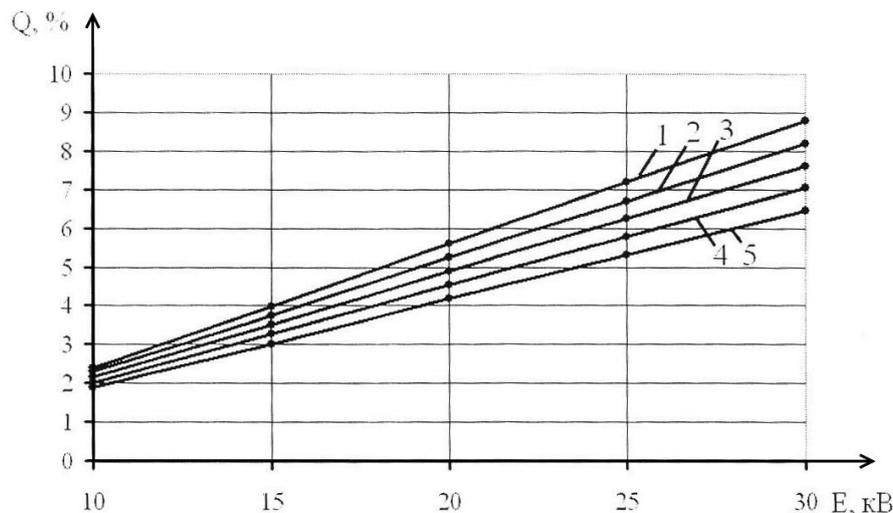
$$Q = -1,037d_1 + 0,148d_2 - 0,074d_3 + (0,367d_1 + 0,167d_2 + 0,089d_3) \cdot E.$$

Результаты расчета выхода концентрата при разных значениях долей классов крупности в зависимости от напряженности электрического поля представлены в табл. 4.

Графическое представление при варьировании первого класса (d_1) приведено на рис. 2.

Таблица 4 – Результаты выхода концентрата при разных значениях долей классов в зависимости от напряженности поля

Доля концентрата в пробе			Базальт. Выход концентрата, Q , %				
d_1	d_2	d_3	$E = 10$ кВ	$E = 15$ кВ	$E = 20$ кВ	$E = 25$ кВ	$E = 30$ кВ
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



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

Из рисунка 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 в 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 гор-

ной породы.

Исследование результатов экспериментов по лавобрекции также позволило установить парные линейные уравнения регрессии зависимости выхода концентрата от напряженности электрического поля сепаратора. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Корреляционный анализ зависимости выхода концентрата от напряженности электрического поля для лавобрекции

Крупность, мм	Уравнение регрессии	R^2	F	t_B
-1,0 +0,63	$Q = -0,37 + 0,204E$	0,976	121,0 0	11,00
-0,63 +0,25	$Q = 0,296 + 0,104E$	0,947	53,45	7,31
-0,25 +0,05	$Q = 0,4 + 0,066E$	0,955	64,05	8,00

Из таблицы следует, что имеет место сильное влияние факторного признака (напряженности электрического поля сепаратора) на результативный признак (выход концентрата). Критерием Фишера подтверждена адекватность полученных регрессионных моделей.

С учетом соотношения классов крупности в смеси пробы лавобрекции для выхода концентрата получена следующая модель:

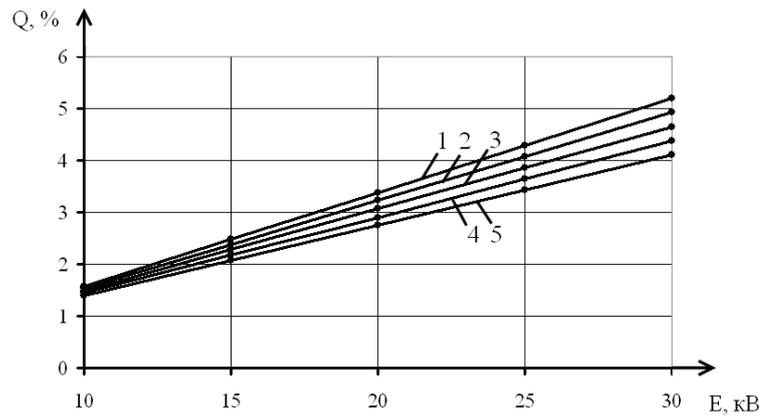
$$Q = -0,37d_1 + 0,296d_2 - 0,4d_3 + (0,204d_1 + 0,104d_2 + 0,066d_3) \cdot E.$$

Результаты расчета выхода концентрата из смеси пробы при разных соотношениях между классами крупности в зависимости от напряженности электрического поля (табл. 6), а также его графическое представление при варьировании первого класса (d_1) приведены на рис. 3.

Таблица 6 – Результаты выхода концентрата при разных значениях долей классов в зависимости от напряженности электрического поля

Доля концентрата в пробе			Лавобрекция. Выход концентрата, Q , %				
d_1	d_2	d_3	$E = 10$ кВ	$E = 15$ кВ	$E = 20$ кВ	$E = 25$ кВ	$E = 30$ кВ
0,4	0,36	0,24	1,40	2,07	2,74	3,42	4,09
0,5	0,30	0,20	1,44	2,17	2,90	3,63	4,36
0,6	0,24	0,16	1,48	2,27	3,06	3,85	4,64
0,7	0,18	0,12	1,53	2,37	3,22	4,07	4,91
0,8	0,12	0,08	1,58	2,48	3,38	4,28	5,19

Из рисунка видно, что, как и в случае с базальтовой смесью, увеличение доли переизмельченной породы в потоке лавобрекции приводит к снижению эффективности процесса извлечения медного концентрата.



$$1 - d_1 = 0,4; \quad 2 - d_1 = 0,5; \quad 3 - d_1 = 0,6; \quad 4 - d_1 = 0,7; \quad 5 - d_1 = 0,8$$

Рисунок 3 – Залежність виходу концентрата від напруженності електричного поля при варіюванні співвідношеннями різних класів крупності для лавобрекчії

Результати кореляційного аналізу залежності виходу концентрата від напруженності електричного поля по туфу представлені в табл. 7.

Таблиця 7 – Кореляційний аналіз залежності виходу концентрата від напруженності поля для туфу

Крупність, мм	Уравнение регрессии	R^2	F	t_B
-1,0 +0,63	$Q = -0,743 + 0,17E$	0,965	83,50	9,14
-0,63 +0,25	$Q = -1,074 + 0,156E$	0,959	69,60	8,34
-0,25 +0,05	$Q = -0,044 + 0,0756E$	0,997	1114,70	33,40

Как и в предыдущих моделях, здесь наблюдается весьма сильное влияние факторного признака на результативный, а также подтверждены адекватность полученного уравнения регрессии и значимость коэффициента регрессии при факторном признаке.

С учетом соотношения классов крупности в смеси туфу для определения выхода концентрата получена следующая модель:

$$Q = -0,741d_1 - 1,074d_2 - 0,044d_3 + (0,17d_1 + 0,156d_2 + 0,0756d_3) \cdot E.$$

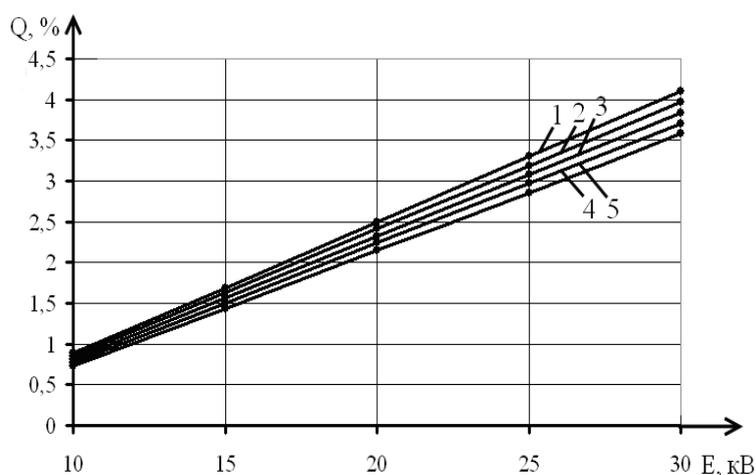
Результаты расчета выхода концентрата из смеси пробы туфу в зависимости от напруженности електричного поля приведены в табл. 8, а его графическое представление в зависимости от соотношения классов крупности изображено на рис. 4.

Из рисунка видно, что для туфу структура смеси по крупности влияет меньше на эффективность процесса извлечения медного концентрата, чем для базальта и лавобрекчії. Однако повышение содержания в смеси первого класса крупности (-1,0 +0,63 мм) приводит к росту выхода концентрата. Это подтвер-

ждается также корреляционными моделями, в которых коэффициент регрессии при факторной переменной для класса крупности ($-0,25 + 0,05$ мм) значительно меньше таких коэффициентов для более крупных классов.

Таблица 8 – Результаты выхода концентрата при разных значениях долей классов в зависимости от напряженности электрического поля

Доля концентрата в пробе			Туф. Выход концентрата Q , %				
D_1	d_2	d_3	$E = 10$ кВ	$E = 15$ кВ	$E = 20$ кВ	$E = 25$ кВ	$E = 30$ кВ
0,4	0,36	0,24	0,729	1,441	2,152	2,863	3,572
0,5	0,30	0,20	0,768	1,503	2,238	2,273	3,707
0,6	0,24	0,16	0,807	1,565	2,324	3,082	3,840
0,7	0,18	0,12	0,846	1,628	2,409	3,191	3,973
0,8	0,12	0,08	0,885	1,690	2,495	3,300	4,105



1 – $d_1 = 0,4$; 2 – $d_1 = 0,5$; 3 – $d_1 = 0,6$; 4 – $d_1 = 0,7$; 5 – $d_1 = 0,8$

Рисунок 4 – Зависимость выхода концентрата от напряженности электрического поля при варьировании содержанием разных классов крупности для туфа

Выполненный комплекс исследований для каждой из трех составляющих базальтовой горной массы по влиянию соотношения крупностей на выход концентрата позволяет выбирать рациональные крупности разделения на участках классификации в цикле подготовки сырья к электрической сепарации [4, 5].

Выводы. В результате выполненных исследований обоснована эффективность использования электросепарации для отделения медного концентрата от измельченной массы базальта, лавобрекчии и туфа после их предварительной магнитной сепарации для отделения титаномагнетита.

Установлены зависимости выхода медного концентрата для базальта, туфа и лавобрекчии от напряженности электрического поля при варьировании содержанием разных классов крупности в исходном продукте. При этом получены регрессионные зависимости выхода медного концентрата от различных соотношений класса крупности в исходном продукте и от напряженности электрического поля.

При разработке технологической схемы комплексной безотходной техноло-

гии переработки базальтового сырья для извлечения медного концентрата рекомендуется электросепарация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат, А.Ф. Перспективы развития сырьевой базы горного производства на основе комплексной переработки техногенных отходов / А.Ф. Булат, В.П. Надутый, Е.З. Маланчук // Геотехническая механика : Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 101. – С. 3-9.
2. Надутый, В.П. Обобщение результатов исследований магнитной восприимчивости составляющих базальтового сырья / В.П. Надутый, А.М. Эрперт, Е.З. Маланчук // Збагачення корисних копалин : Наук.-техн. зб. / Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ, 2012. – Вып. 51(92). – С. 144-149.
3. Надутый, В.П. Выбор факторов влияния и определение зависимостей производительности валковой дробилки от их параметров / В.П. Надутый, Е.З. Маланчук // Збагачення корисних копалин : Наук.-техн. зб. / Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ, 2011. – Вып. 47(88). – С. 64-68.
4. Надутый, В.П. Исследование закономерностей мелкого вибрационного грохочения базальтового сырья / В.П. Надутый, Е.З. Маланчук, И.П. Хмеленко // Геотехническая механика : Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 94. – С. 144-150.
5. Надутый, В.П. Исследование влияния режимных и конструктивных параметров на технологические показатели тонкого виброгрохочения базальтового сырья / В.П. Надутый, И.П. Хмеленко, Е.З. Маланчук // Збагачення корисних копалин : Наук.-техн. зб. / Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ, 2011. – Вып. 46(87). – С. 35-41.
6. 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. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 101. – С. 291-295.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Naduty, V.P. and Malanchuk, Ye.Z. (2012), "Prospects of development of raw base of mountain manufacture on the basis of complex processing technogenic wastes", *Geo-Technical Mechanics*, no. 101, pp. 3-9.
2. Naduty, V.P., Erpert, A.M. and Malanchuk, Ye.Z. (2012), "Summary of the studies of the magnetic susceptibility of basalt raw material components", *Zbahachennia korysnykh kopalyn*, no. 51(92), pp. 144-149.
3. Naduty, V.P. and Malanchuk, Ye.Z. (2011), "Choice of the factors of influence and definition of dependences of productivity roll crusher from their parameters", *Zbahachennia korysnykh kopalyn*, no. 47(88), pp. 64-68.
4. Naduty, V.P., Malanchuk, Ye.Z. and Khmelenko, I.P. (2011), "Research of laws fine vibrating screening of basalt raw material", *Geo-Technical Mechanics*, no. 94, pp. 144-150.
5. Naduty, V.P., Khmelenko, I.P. and Malanchuk, Ye.Z. (2011), "Investigation of the influence of operational and design parameters on the technological characteristics of thin vibrating separation of basalt raw material", *Zbahachennia korysnykh kopalyn*, no. 46(87), pp. 35-41.
6. Naduty, V.P., Malanchuk, Ye.Z. and Griniuk, T.Yu. (2012), "Determination of efficiency of the electrostatic field use at the complex processing of basalt raw material", *Geo-Technical Mechanics*, no. 101, pp. 291-295.

Об авторах

Надутьий 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, nadutyvr@yandex.ua

Маланчук Евгений Зиновьевич, канд. техн. наук, доцент, Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Ровно, Украина, malanchykez@mail.ru

Эрперт Александр Михайлович, канд. техн. наук, профессор, Государственное высшее учебное

заведення «Национальный горный университет» МОН України (Государственный ВУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Україна.

About the authors

Naduty Vladimir Petrovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, M.C. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, nadutyvp@yandex.ua

Malanchuk Yevgeniy Zinovyevich, Ph.D. (Tech.), Associate Professor, National University of Water Management and Nature Resources Use, Rovno, Ukraine, malanchykez@mail.ru

Erpert Aleksandr Mikhailovich, Ph.D. (Tech.), Professor, State Higher Education Institution “National Mining University” (State HEI “National Mining University”), Dnepropetrovsk, Ukraine

Анотація. У роботі представлено результати досліджень впливу електричного поля на процес вилучення магнітосприйнятливої міді з базальтової сировини, що складається з трьох порід: базальту, туфу і лавобрекчії. Усі три складові містять у різному процентному відношенні самородну мідь, але в достатній кількості для раціонального вилучення. У статті вирішено актуальну задачу доказу ефективності використання електросепарації на кінцевій стадії комплексної переробки базальтової сировини. Предметом дослідження були залежності кількості вилученого мідного концентрату від напруженості електричного поля сепаратора і від крупності подаваної на нього гірської маси.

На підставі виконаного комплексу досліджень проведено кореляційний аналіз залежностей виходу концентрату самородної міді від напруженості електричного поля і співвідношення класів крупності у досліджуваних пробах трьох гірських порід та отримано регресійні моделі для оцінки кількісного виходу концентрату.

Таким чином, обґрунтовано доцільність використання електросепарації на кінцевій стадії комплексної переробки базальтової сировини.

Ключові слова: базальт, туф, лавобрекчія, самородна мідь, електросепарація.

Abstract. The paper presents findings on electric field impact on process of extracting magneto-susceptible copper from the basalt raw materials consisting of three types of rock: basalt, tuff and longwall breccia. The three components contain different percentage of native copper which is, nevertheless, sufficient for efficient copper extraction. In the paper, the author proves high effectiveness of using electric separation at the final stage of the basalt complex processing. Subject of the study was dependences between extracted copper concentrate output, electric field intensity in separator and size grades of the rocks fed for separation.

As a result of the study, correlation of dependences between native copper concentrate output, electric field intensity and size grades in three test samples of mined rock has been analyzed and regression models have been created for assessing the concentrate output.

Thus, effectiveness of using electrical separation at the final stage of the basalt complex processing has been proved.

Key words: basalt, tuff, longwall breccia, native copper, electric separation.

Статья поступила в редакцию 1.11.2014

Статья рекомендована к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом

УДК 622.648.01

Киричко С.Н., аспирант
(ИГТМ НАН Украины)**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ
ГИДРОТРАНСПОРТА ПАСТ НА ОСНОВЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ОЦЕНКИ
РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ****Киричко С.М.**, аспірант
(ИГТМ НАН України)**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМ
ГІДРОТРАНСПОРТУ ПАСТ НА ОСНОВІ ЛАБОРАТОРНОЇ ОЦІНКИ
РЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ****Kirichko S.N.**, Doctoral Student
(IGTM NAS of Ukraine)**OPERATING EFFICIENCY OF THE PASTE TRANSPORTING
HYDROSYSTEMS ENSURED BY LABORATORY ESTIMATED RHEO-
LOGICAL PARAMETERS**

Аннотация. Предметом исследования является моделирование напорного истечения пульпы с концентрацией пасты через трубопровод при вытеснении ее из цилиндра поршнем. Исследования выполнены с целью разработки метода оценки реологических параметров пасты, образованной из отходов обогащения конкретного горно-обогатительного комбината, позволяющего в лабораторных условиях оценить зависимость гидравлического уклона от скорости и концентрации пульпы. В статье приводится математическая модель процесса, описание стенда для лабораторных исследований, методика обработки и результаты экспериментов для паст, полученных из отходов обогащения Центрального горно-обогатительного комбината. Проведенные испытания показали, что реологическая характеристика паст из рассматриваемых отходов обогащения железной руды описывается законом Бингама-Шведова, для которого впервые получены зависимости начального напряжения сдвига и структурной вязкости от концентрации пульпы.

Ключевые слова: пульпа с концентрацией пасты, закон Бингама-Шведова.

Введение. Одним из перспективных путей повышение эффективности гидротранспортных систем горно-обогатительных комбинатов (ГОКов) является внедрение технологий сгущения пульп до концентрации пасты (ПКП), что позволяет существенно снизить объемы транспортируемой воды и потребляемой электроэнергии, а также снизить диаметр магистралей и объем отходов, поступающих в хранилище. Анализ возможных режимов работы показывает, что формулу для определения объемного расхода пульпы, обеспечиваемого гидротранспортной установкой, можно представить в следующем виде [6]:

$$Q = MG(1 - \omega), \quad (1)$$

$$M = \frac{\mu}{1 + \tilde{\beta}\mu}, \quad G = \tilde{\alpha} - \frac{\rho}{k} i_Z, \quad \omega = \frac{4k_\tau \tau_0}{\rho_0 g DG},$$