

Булат А.Ф., акад. НАН України,
д-р техн. наук, професор,
Надуть В.П., д-р техн. наук, професор
(ИГТМ НАН України)

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

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕДНОГО КОНЦЕНТРАТА ИЗ БАЗАЛЬТА**

Булат А.Ф., акад. НАН України,
д-р техн. наук, професор,
Надуть В.П., д-р техн. наук, професор
(ИГТМ НАН України)

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

**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ
ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ
ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ МІДНОГО КОНЦЕНТРАТУ З БАЗАЛЬТУ**

Bulat A.F., Acad NASU,
D.Sc. (Tech.), Professor,
Naduty V.P., D.Sc. (Tech.), Professor
(IGTM NAS of Ukraine)

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

**RESULTS OF RESEARCHES OF EFFICIENCY
OF ELECTRICAL FIELD USE FOR PRODUCTION
COPPER CONCENTRATE FROM BASALT**

Аннотация. Предметом исследований является эффективность использования процесса электрической сепарации на конечной стадии переработки измельченного базальта для извлечения концентрата самородной меди. Эта технологическая операция входит в технологию комплексной безотходной переработки базальтов. Поскольку базальт обладает высоким содержанием титаномагнетита, то предварительно измельченную смесь сепарируют на магнитном сепараторе, после чего магнитноневосприимчивая часть, включающая самородную медь, пропускается через электросепаратор.

В процессе исследований определены рациональные классы крупности для электросепарации, установлено количество выхода медного концентрата для трех классов крупности базальта, а также зависимость количества концентрата от напряженности электрического поля сепаратора.

Поскольку в реальных условиях на сепаратор поступает смесь классов крупности в рекомендуемых пределах, то выполнен корреляционный анализ зависимости выхода медного концентрата с учетом соотношения классов крупности и от величины напряженности электрического поля. Полученная зависимость позволяет прогнозировать эффективность процесса извлечения медного концентрата из базальта, а на конечной стадии его переработки рекомендован к использованию процесс электросепарации.

Ключевые слова: базальт, класс крупности, самородная медь, титаномагнетит, магнитная и электрическая сепарация, медный концентрат.

Выполненный ранее комплекс исследований по определению минерального состава базальтов Волыни указал на высокое содержание в них железа, титана, самородной меди и других металлов [1]. Это обстоятельство потребовало более глубокого изучения состава и методов переработки базальтов для расширения номенклатуры конечных продуктов, поскольку до настоящего времени базальт использовался, в основном, как сырье для строительства (щебень, облицовочная плитка и т. п.). Предшествующие изыскания авторов выявили высокое содержание в исследуемых базальтах титаномагнетита ($18 \div 20$ %) [2] и меди. Уникальность месторождения заключается в том, что кроме окисленных разновидностей меди (куприт, сфалерит, азурит, халькопирит), базальт содержит самородную медь в количествах ($0,35 \div 1,5$ %), представляющих промышленный интерес. Поэтому процесс рудоподготовки базальтового сырья требует дополнительных исследований, связанных с классификацией по крупности измельченной массы, последующей магнитной сепарацией для отделения магнитновосприимчивой части (титаномагнетита) от силикатной, в состав которой отходит и самородная медь, не обладающая магнитной восприимчивостью [2]. Предыдущими исследованиями была показана эффективность использования электростатического поля для выделения самородной меди из силикатной части [3, 4].

Актуальность дальнейших исследований заключается в определении рациональной крупности измельченного базальта, параметров электрического поля для извлечения самородной меди и ее сростков.

Целью исследований в данной работе являлось определение нижнего и верхнего пределов крупности подаваемого на электрическую сепарацию измельченного базальта, влияние напряжения электрического поля сепаратора на процентное содержание извлекаемого концентрата самородной меди, а также определение на основе корреляционного анализа экспериментальных результатов выхода концентрата.

Исследования выполнены на электросепараторе ПС-1 лабораторного типа. При этом навески измельченного базальта весом до 3,0 кг, из которых предварительно на магнитном сепараторе выделена магнитновосприимчивая часть, пропускались через сепаратор. На электрическом сепараторе каждая фракция разделялась на три продукта: концентрат – электропроводная часть, промпродукт – полупроводящая часть в виде сростков и силикатная – непроводящая часть. Среднестатистические результаты экспериментов приведены в табл. 1. Исследования проведены с изменением напряженности электрического поля сепаратора в пределах $10 \div 30$ кВ при расसेве базальта по трем классам крупно-

сти $-1,0 + 0,63$ мм, $-0,63 + 0,25$ мм и $-0,25 + 0,05$ мм [5]. В каждом эксперименте использовалась навеска в 2700 г каждого класса крупности, и фиксировалось извлечение концентрата при напряженности электрического поля 10 кВ, 15 кВ, 20 кВ, 25 кВ и 30 кВ.

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

Крупность, мм	Выход концентрата	Напряженность электрического поля, кВ				
		10	15	20	25	30
$-1,0 + 0,63$	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	40
	%	1,852	2,778	3,519	3,704	5,556
$-0,25 + 0,05$	грамм	20	35	50	40	15
	%	0,741	1,296	1,852	2,037	2,593

Результаты эксперимента представлены накопленным итогом по мере увеличения напряженности. По полученным данным вычислен выход концентрата (Q , %).

Из таблицы видно, что для всех трех классов крупности выход концентрата увеличивается с повышением напряженности электрического поля. В табл. 2 представлены полученные результаты в более удобной форме для анализа оценки степени влияния напряженности.

Таблица 2 – Выход концентрата электросепарации при разной напряженности электрического поля

Крупность, мм	Выход концентрата	Напряженность электрического поля, кВ				
		10	15	20	25	30
$-1,0 + 0,63$	%	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	8,32	11,67	13,67	18,52
Итого выход классов $-1,0 + 0,05$ мм в концентрат:		57,75 %				
Выход относительно 10 кВ	ед.	1,00	1,59	2,17	2,55	3,45

В данной таблице за единицу принят выход концентрата при напряженности 10 кВ и пересчитаны выхода при других напряженностях относительно значе-

ния выхода при 10 кВ. Полученная зависимость показывает, что увеличение напряженности электрического поля в три раза (с 10 кВ до 30 кВ) ведет к увеличению выхода концентрата меди из базальта также примерно в 3 раза. Однако для широкого класса крупности базальта, подаваемого на сепаратор (–1,0 +0,05 мм), повышение напряженности электрического поля с 20 кВ до 30 кВ увеличивает абсолютный выход концентрата не столь значительно (18,52 – 11,67 = 6,85 %). Это связано с тем, что в указанном широком классе крупности присутствуют узкие классы, которые лучше извлекаются на электросепараторе, а также сростки самородной меди с вмещающей породой.

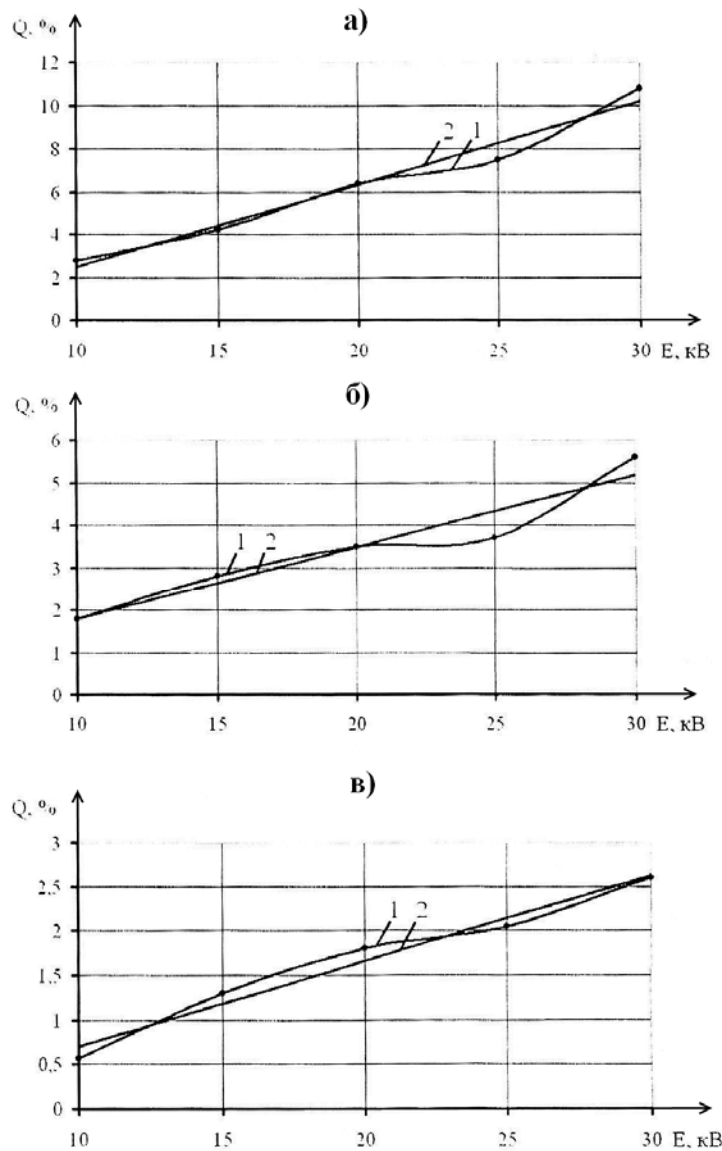
Для дальнейшего анализа оптимальной крупности питания электросепарации использовался метод корреляционного анализа, при котором по каждому классу крупности были получены парные линейные уравнения регрессии зависимости выхода концентрата (Q) от напряженности электрического поля сепаратора (E). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Корреляционный анализ зависимости выхода концентрата от напряженности электрического поля

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

Анализ расчетов показывает, 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 факторном признаке также существенно превышает критическое значение ($t_k = 3,18$), что является подтверждением значимости этого коэффициента в регрессионной модели при уровне значимости 0,05. Графическое представление экспериментальных и расчетных данных по зависимости выхода концентрата от напряженности электрического поля показано на рис. 1.

В реальных условиях комплексной технологии при извлечении медного концентрата на сепаратор подается горная масса, в которой все классы крупности находятся вместе в некотором соотношении. Поэтому исследовался вопрос влияния соотношения между разными классами на выход концентрата. Для этого обозначим d_i – доля в смеси i -го класса крупности, где $i = 1, 2, 3$. При этом d_1 соответствует классу –1,0 +0,63 мм, d_2 и d_3 соответствуют следующим по порядку классам, а $\sum d_i = 1$. 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



а) для крупности $-1,0 +0,63$ мм; б) для крупности $-0,63 +0,25$ мм;
в) для крупности $-0,25 +0,05$ мм

Рисунок 1 – Зависимость экспериментального (1) и расчетного (2) выхода концентрата от напряженности электрического поля для базальта

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 показаны в табл. 4, а графическое представление при варьировании первого класса (d_1) изображено на рис. 2.

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

Доля концентрата в пробе			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

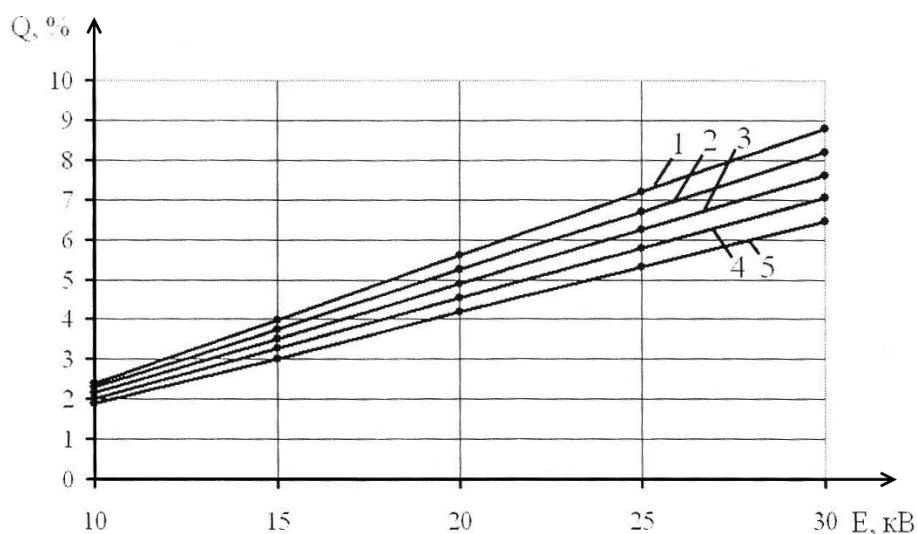


Рисунок 2 – Зависимость выхода концентрата от напряженности электрического поля при варьировании содержанием разных классов крупности для базальта

Из рисунка видно, что при низкой напряженности электрического поля долевой состав крупности в пробе слабо влияет на величину выхода концентрата. Это объясняется низкой эффективностью извлечения при $E = 10$ кВ. По мере роста напряженности электрического 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 переизмельченного базальта, то это приводит к снижению эффективности процесса извлечения медного концентрата.

Выводы. В результате выполненных исследований показана эффективность использования процесса электросепарации для отделения медного концентрата от измельченной массы базальта после ее предварительной магнитной сепарации для отделения титаномагнетита.

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

Установлены зависимости выхода медного концентрата из базальта от на-

пряженности электрического поля при варьировании содержанием разных классов крупности, подаваемых на электросепарацию.

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

Операция электросепарации рекомендуется к использованию на конечной стадии комплексной переработки базальта для получения концентрата самородной меди, а также силикатной части для нужд строительства.

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. науч. тр. / Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова 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. – Вип. 51(92). – С. 144-149.

3. 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. / Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 101. – С. 291-295.

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

5. Результаты исследований и разработки средств мелкой и тонкой классификации горной массы для реализации ее безотходной технологии переработки / А.Ф. Булат, В.П. Надутый, Е.З. Маланчук // Форум гірників-2013 : Матер. міжнар. наук. конф. Т. 1. – Дніпропетровськ : НГУ, 2013. – С. 225-229.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Nadutyu, 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. Nadutyu, 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* [Enrichment of minerals], no. 51(92), pp. 144-149.

3. Nadutyu, V.P. Malanchuk, Ye.Z. and Griniuk T.Yu. (2012), "Determination of efficiency of the electrostatic field use at the complex processing of raw basalt", *Geo-Technical Mechanics*, no. 101, pp. 291-295.

4. Olofinskiy, N.F. (1977), *Elektricheskiye metody obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Electrical methods of mineral enrichment], Nedra, Moscow, Russia.

5. Bulat, A.F., Nadutyu, V.P. and Malanchuk, Ye.Z. (2013), "Results of research and development of devices for small and fine classification of the mined rock to achieve its waste-free processing technology", *Proc. of the International scientific conference "Forum of Miners-2013"*, National Mining University, Dnepropetrovsk, pp. 225-229.

Об авторах

Булат Анатолий Федорович, академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, директор института, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепропетровск, Украина, [of-
fice.igtm@nas.gov.ua](mailto:office.igtm@nas.gov.ua).

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

Маланчук Евгений Зиновьевич, канд. техн. наук, доцент кафедри разработки месторождений полезных ископаемых, Национальный университет водного хозяйства и природопользования (НУВХП), г. Винница, Украина, malanchykez@mail.ru.

About the author

Bulat Anatoly Fegorovich, Academician of the Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Director of the Institute, M.C. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, of-fice.igtm@nas.gov.ua.

Nadutyu 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, nadutyu@yandex.ua.

Malanchuk Yevgeny Zinovyevich, Candidate of Technical Sciences (Rh.D), Associate Professor of Department of Mineral Mining and Technology of Inorganic Substances, National University of Water Management and Nature Resources Use, Vinnitsa, Ukraine, malanchykez@mail.ru.

Анотація. Предметом досліджень є ефективність використання процесу електричної сепарації на кінцевій стадії переробки здрібненого базальту для вилучення концентрату самородної міді. Ця технологічна операція входить до технології комплексної безвідхідної переробки базальтів. Оскільки базальт має високий вміст титаномagnetиту, то попередньо здрібнену суміш сепарують на магнітному сепараторі, після чого магнітонесприйнятлива частина, що включає самородну мідь, пропускається через електросепаратор.

У процесі досліджень визначено раціональні класи крупності для електросепарації, встановлено кількість виходу мідного концентрату для трьох класів крупності базальту, а також залежність кількості концентрату від напруженості електричного поля сепаратора.

Оскільки в реальних умовах на сепаратор надходить суміш класів крупності в рекомендованих межах, то виконано кореляційний аналіз залежності виходу мідного концентрату з урахуванням співвідношення класів крупності й від величини напруженості електричного поля. Отримана залежність дозволяє прогнозувати ефективність процесу вилучення мідного концентрату з базальту, а на кінцевій стадії його переробки рекомендовано до використання процес електросепарації.

Ключові слова: базальт, клас крупності, самородна мідь, титаномagnetит, магнітна й електрична сепарація, мідний концентрат.

Abstract. The subject of research is the efficient use of electric separation process at the final stage of processing crushed basalt to extract native copper concentrate. This process operation is included into the integrated waste-free processing technology of basalts. Since basalt has a high content of titan magnetite, the pre-ground mixture is separated onto a magnetic separator, and then magnet-resistant part, including native copper, is passed through the electrostatic separator.

During the studies, the rational size fractions for electrostatic separation were defined, the output amount of copper concentrate for the three size fractions of basalt and also the dependence of the concentrate amount on the electric field intensity of the separator were set.

Since in real conditions the mixture of size fractions entering onto the separator lies between the recommended ranges, the correlation analysis of copper concentrate output dependence on the ratio of the size fractions and the electric field intensity was carried out. The obtained dependence allows predicting the efficiency of extraction of copper concentrate from the basalt, and at the final stage of its processing it is recommended to use the process of electrostatic separation.

Keywords: basalt, size fractions, native copper, titan magnetite, magnetic and electrostatic separation, copper concentrate.

Статья поступила в редакцию 10.06.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В. И. Дырдой

УДК 622.023:624.046.3:539.3

Скипочка С. И., д-р техн. наук, профессор
Сергиенко В. Н., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Войтович Т. Г., асп.
(ИГТМ НАН Украины)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕОКОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПОРОДАХ С БЛОЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

Скіпочка С. І., д-р техн. наук, професор
Сергієнко В. М., канд. техн. наук, ст. наук. співр.
Войтович Т. Г., асп.
(ІГТМ НАН України)

МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ГЕОКОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ В ПОРОДАХ З БЛОКОВОЮ СТРУКТУРОЮ

Skipochka S. I. D. Sc. (Tech.), Professor
Sergienko V. N., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
Vojtovich T. G., Doctoral Student
(IGTM NAS of Ukraine)

MODELING STABILITY LOSS GEOCOMPOSITE CONSTRUCTION IN THE ROCKS BLOCK-STRUCTURED

Аннотация. Объект исследований – устойчивость системы «горная выработка – крепь – породный массив». Цель работы – установить особенности потери устойчивости горных выработок, оборудованных геокomпозитной охранно-поддерживающей конструкцией. Метод исследований – физическое моделирование на эквивалентных материалах. Затронуты проблемы, связанные с внедрением геокomпозитных охранно-поддерживающих конструкций. Обоснованы метод исследований и характеристики физических моделей. Исследован процесс деформирования геокomпозитных конструкций в мелкоблочной структуре среды для рамно-анкерной и рамно-анкерно-тросовой моделей. Установлены деформационные характеристики, общие и отличительные признаки потери устойчивости моделей. Показано, что при использовании рамно-анкерно-тросовой крепи потеря устойчивости геокomпозитной конструкции (за счет сдерживания перехода крупноблочной структуры в мелкоблочную) происходит при более высоких нагрузках. Эти преимущества могут быть реализованы только при наличии анкеров с высокими техническими характеристиками, большой глубиной заложения, а также высокой прочностью закрепления в массиве.

Ключевые слова: горная выработка, крепь, блочная структура массива, геокomпозитная охранно-поддерживающая конструкция, физическое моделирование, устойчивость.

Оценка устойчивости системы «выработка-крепь-массив» – ключевая задача геомеханики. Для поддержания горных выработок широко используются анкерные сталеполимерные, тросовые, штанговые железобетонные и другие крепи, взаимодействие которых с породами создает в массиве, своего рода, геокomпозитную охранно-поддерживающую конструкцию (далее – геокomпозитная конструкция).