

Д-р техн. наук В.П. Надутый,  
инж. П.В. Левченко,  
канд. техн. наук Е.З. Маланчук  
(ИГТМ НАН Украины)

**МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ  
ИЗВЛЕЧЕНИЯ САМОРОДНОЙ МЕДИ ИЗ ПОРОД  
БАЗАЛЬТОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕТОДОМ  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ**

Представлено результати моделювання експериментальних результатів з визначення залежності вилучення самородної міді методом електричної сепарації із основних складових базальтової сировини у вигляді регресійних рівнянь.

**MODELLING REPRESENTATION OF DEPENDENCE  
EXTRACTION NATIVE COPPER FROM BREEDS  
BASALT DEPOSIT BY A METHOD  
ELECTROSTATIC SEPARATION**

Modelling representation the results of modeling of experimental results by definition of dependence of extraction native copper by a method of electrical separation from the basic components of basalt raw material as the regression equations are submitted.

Результаты исследований базальтовых месторождений Волыни показали их богатый элементный состав, указывающий на необходимость комплексной безотходной переработки. Уникальность месторождения заключается в наличии высокого содержания самородной меди. Основными составляющими месторождения являются непосредственно базальт и сопровождающие породы в виде туфа и лавобрекчии. Если в настоящее время добытый базальт используют для строительства, то туф и лавобрекчия складироваться в отвалах. При этом все три оставляющие имеют высокое содержание самородной меди, а отвалы по своим объемам и содержанию представляют собой техногенные месторождения. Исходя из этих соображений, выполнен комплекс исследований по содержанию, добыче, рудоподготовке и извлечению железосодержащих компонентов вместе с титаном и марганцем (около 45÷47 %) и самородной меди (от 0,4 до 4,0 %). Одной из возможных операций в технологической схеме извлечения меди является электростатическая сепарация подготовленной горной массы.

Предварительные лабораторные исследования показали эффективность этого метода [1, 2], и возникла необходимость модельного представления экспериментальных результатов для подбора параметров оборудования, разработки технологии извлечения меди, как на проектном этапе, так и при создании участка переработки.

**Целью работы** является построение на основании экспериментальных данных идентификационных моделей зависимости производительности извлечения меди из основных трех компонентов базальтового сырья от их крупности и напряженности электростатического поля сепаратора.

Полученные ранее [3] экспериментальные результаты по извлечению меди на электростатическом сепараторе представлены в табл. 1

Таблица 1-Результаты электросепарации базальтового сырья (прибор ПС-1)-

№ п/п	Материал	Крупность, мм	Магнитная часть		Немагнитная часть						Общая масса навески, гр.
					Проводниковая фракция		Полупроводниковая Фракция		Непроводящая фракция		
			гр.	%	гр.	%	гр.	%	гр.	%	
1	Базальт	-1,0 +0,8	370	63,8	190	32,8	20	3,4	0	0,0	580
2	Базальт	-0,8 +0,15	740	67,3	50	4,5	30	2,7	28	25,5	1100
3	Лавобрекчия	-0,8 +0,15	22	51,2	60	14,0	50	11,6	10	23,3	430
4	Туф	-0,8 +0,15	29	48,3	40	6,7	60	10,0	21	35,0	60

На их основе выполнен графический анализ в виде пространственной модели зависимости количества извлеченной меди  $Q$ , гр. от напряженности электростатического поля сепаратора  $E$ , кВ и крупности  $\Delta$ , мм измельченной медьсодержащей горной массы.

Регрессионные зависимости извлечения меди  $Q$ , гр. (функция отклика) от вышеперечисленных факторов получали на основании выполненных исследований для каждой составляющей базальтового сырья, с общим объемом статистических данных  $n = 15$ , в следующем виде:

$$Q = a_0 + a_1 \cdot E + a_2 \cdot \Delta + a_3 \cdot E \cdot \Delta + a_4 \cdot E^2 + a_5 \cdot \Delta^2.$$

Общее количество слагаемых уравнения регрессии составило  $m = 5$ . Расчёт данной модели методом наименьших квадратов производился средствами прикладного пакета обработки статистических данных SPSS Statistics с применением встроенной функции “Шаговый отбор”. При работе данного алгоритма независимые переменные ( $x_i$ ), которые имеют наибольшие коэффициенты частичной корреляции с зависимой переменной ( $Q$ ), пошагово включаются в регрессионное уравнение [4]. После каждого шага оценивалась адекватность полученной модели  $F$  (статистика Фишера) и коэффициент детерминации  $R^2$ , а факторы, коэффициенты регрессии которых по статистике Стьюдента оказывались незначимыми ( $t_{\text{табл}} \geq t_{\text{ai}}$ ), исключались из регрессионной зависимости без особого влияния на результативный признак  $Q$ . По знаку коэффициента регрессии  $a_i$  можно определить влияния соответствующего фактора  $x_i$  на выход меди: положительный знак свидетельствует о возрастании функции  $Q$  при увеличении фактора  $x_i$ , отрицательный – о снижении, а абсолютное значение коэффициента  $a_i$  показывает, на сколько измениться результативный признак при изменении

соответствующего фактора на единицу.

Зависимость количества извлечения меди из базальта для разных классов его крупности идентифицируется следующим уравнением:

$$Q_{\Delta} = 3,142 + 11,975 \cdot E \cdot \Delta - 50,532 \cdot \Delta^2.$$

При этом статистика Фишера  $F = 536,08$ , а коэффициент множественной корреляции  $R^2 = 0,989$  показывает, что изменчивость функции  $Q_{\Delta}$  на 98,9 % объясняется влиянием учтённых в модели факторов. Данная зависимость в виде поверхности представлена на рис. 1.

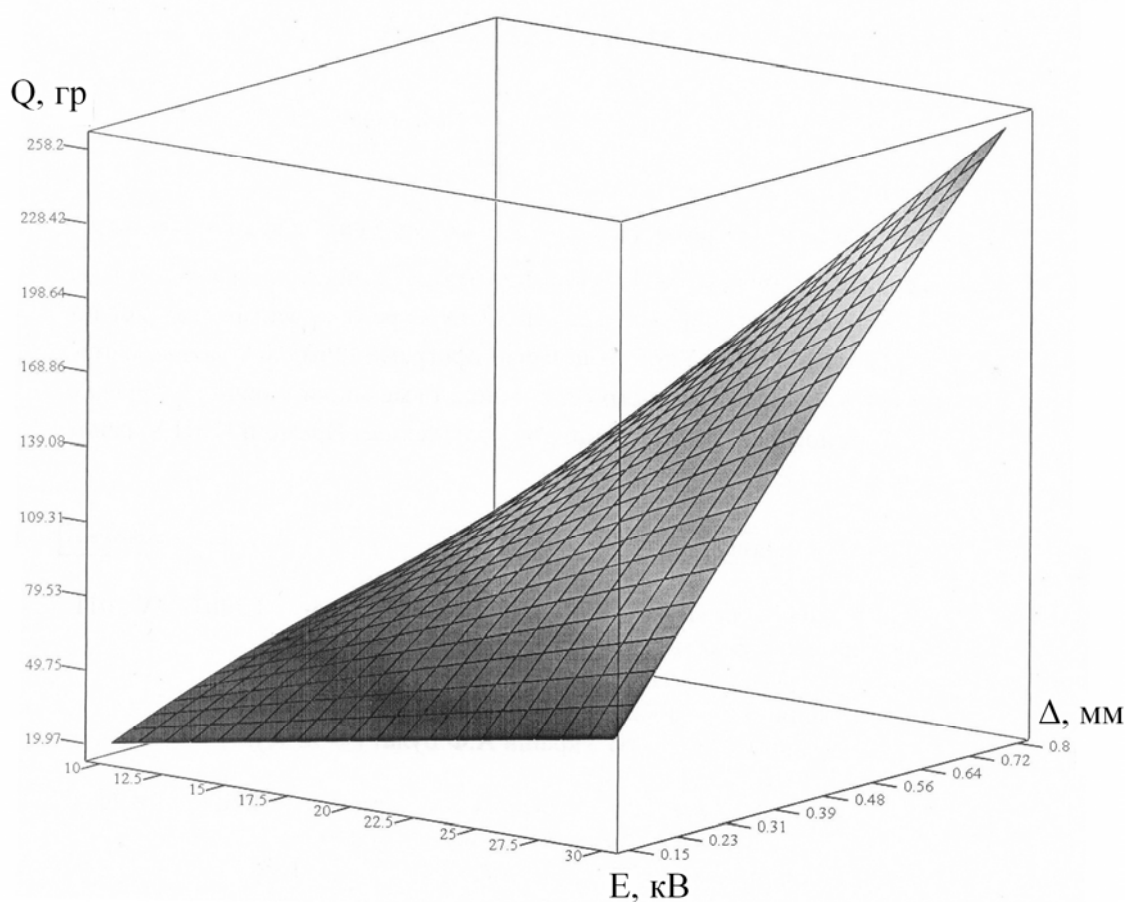


Рис. 1 – Зависимость количества извлечения меди из базальта от напряженности поля сепаратора и классов крупности.

График зависимости количества извлечения меди из лавобрекчии в пределах исследуемых классов крупности показан на рис. 2, а аппроксимация этой зависимости в регрессионной форме имеет вид:

$$Q_{\tilde{e}} = 0,067 + 1,318E + 4,374E \cdot \Delta.$$

Уравнение получено при коэффициенте множественной корреляции  $R^2 = 0,966$  и статистике Фишера  $F = 168,23$ . При работе с горной массой из туфа особенно важно определиться с параметрами оборудования и грансоставом, по-

сколько он содержит точечные включения самородной меди в пределах 0,1÷0,9 мм.

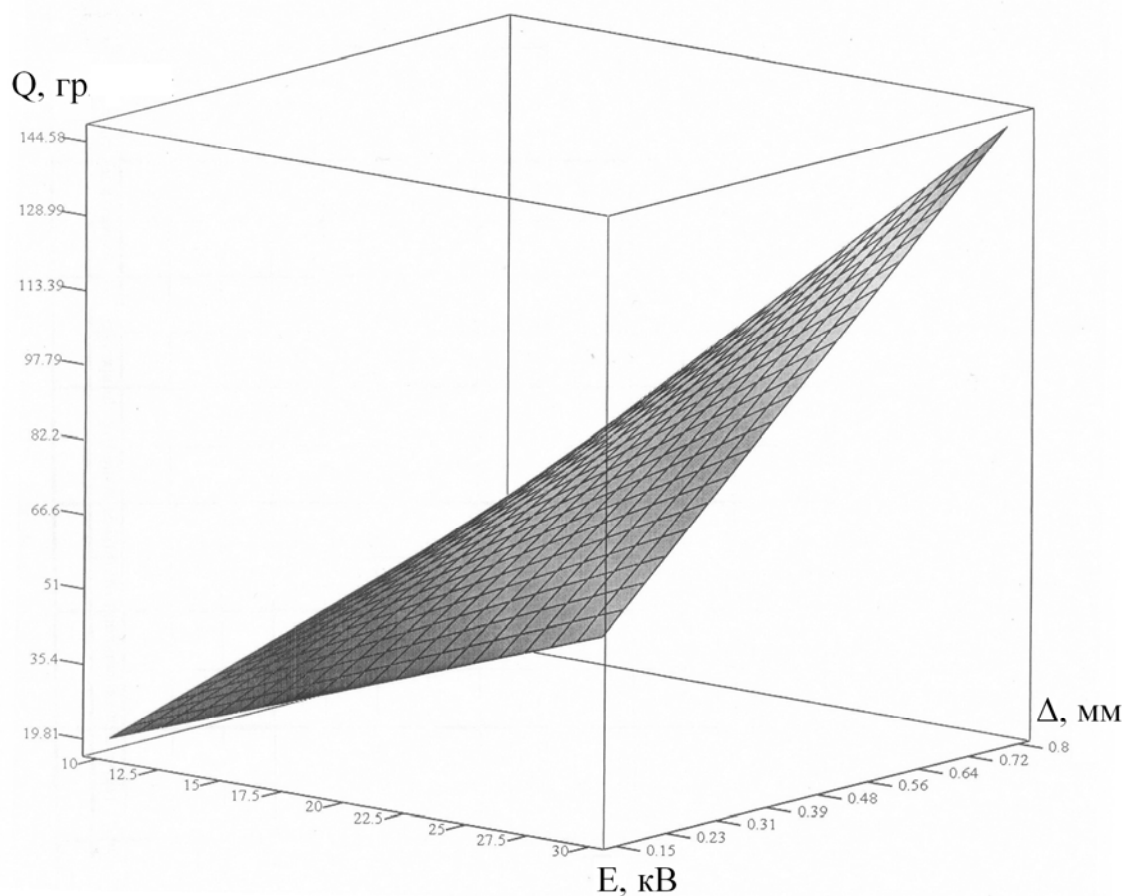


Рис. 2 – Зависимость количества извлечения меди из лавобрекции от напряженности поля сепаратора и классов крупности.

Графический анализ результатов исследований зависимости извлечения меди из туфа в пределах этой крупности представлена на рис. 3, а аппроксимация этой зависимости имеет вид:

$$Q_i = -46,419 + 322,954 \cdot \Delta \cdot E^2 - 322,462 \cdot \Delta^2$$

Наибольшая достоверность полученной зависимости наблюдается при коэффициенте  $R^2 = 0,962$  и статистика Фишера  $F = 33,754$ .

Таким образом, полученные модельные зависимости позволяют определять выход самородной меди при заданных параметрах напряжения в электростатическом сепараторе при переработке мелкоизмельченной массы медьсодержащих пород базальтового месторождения.

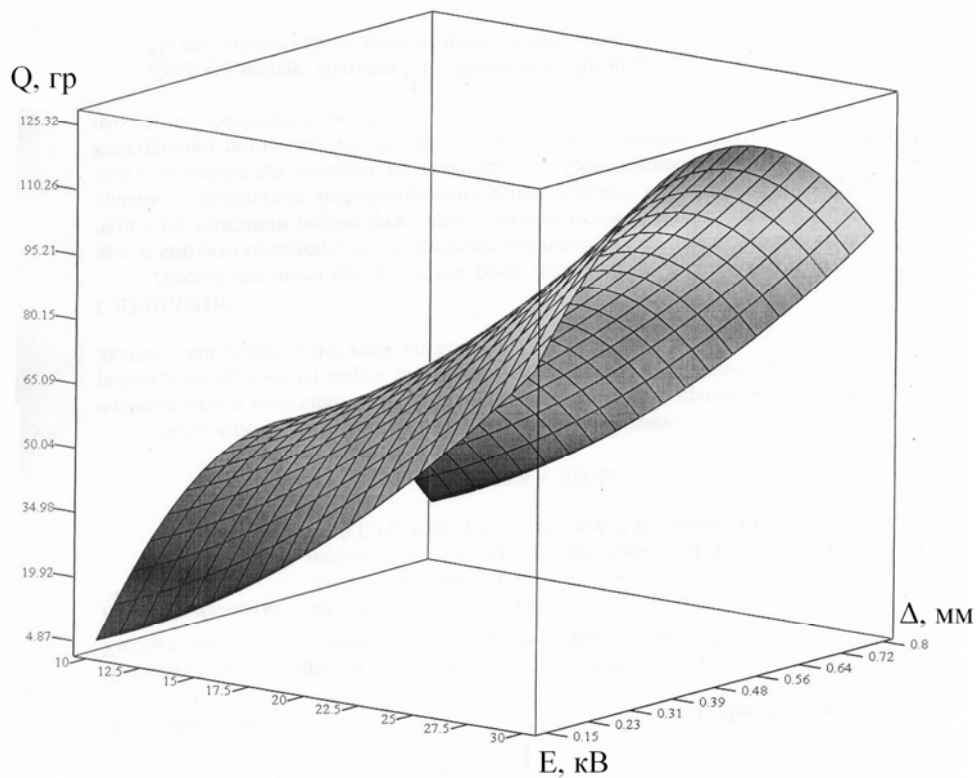


Рис. 3 – Зависимость количества извлечения меди из туфа от напряженности поля сепаратора и классов крупности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надутый В.П. Определение элементного состава вскрышных и основных пород Рафаловского базальтового карьера / В.П. Надутый, З.Р. Маланчук, Т.Ю. Гринюк // Геотехническая механика : Межвед. сб. нач. тр. / Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 68. – С. 28-32.
2. Надутый В.П. Закономірність розміщення самородної міді в базальтовій лавобрекчії при різному її гранулометричному складі / В.П. Надутый, З.Р. Маланчук, Т.Ю. Гринюк, С.Є. Стець / Вісник Національного університету водного господарства та природокористування : Зб наук. праць. – Рівне, 2005. – Вип. 4(32). – С. 215-230.
3. Надутый В.П. Определение эффективности использования электростатического поля при комплексной переработке базальтового сырья / В.П. Надутый, З.Р. Маланчук, Т.Ю. Гринюк // Геотехническая механика : Межвед. сб. нач. тр. / Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 101. – С. 41-49.
4. Бююль А., Цефель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. – СПб.: ООО «Диа-СофтЮП», 2005. – 608 с.

Кандидаты техн. наук А.В. Шаповал,  
А.С. Головки,  
Е.С. Титякова,  
(ПГАСА)  
канд. техн. наук В.С. Андреев  
(ДНУЖТ)

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАМКАХ МОДЕЛИ УПРУГОГО ГРУНТОВОГО СЛОЯ

В рамках расчетной схемы основания в виде слоя конечной толщины получены функции влияния матрицы податливости метода граничных элементов. Рассмотрена модель линейного упругого изотропного основания. Область применения полученных в работе результатов – определение напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтовых оснований и расположенных на них фундаментов зданий и сооружений.

## TO DETERMINATION OF BORDER ELEMENTS WITHIN THE FRAMEWORK OF MODEL OF THE RESILIENT GROUND LAYER

Within the framework of calculation chart of founding as a layer of eventual thickness the functions of influence of matrix of pliability of method of border elements are got. The model of the linear resilient izotropic founding is considered. An application of the results got in-process domain is determination of the tensely-deformed state(VAT) of the ground grounds and foundations of building and building located on them.

При написании настоящей статьи преследовалась цель в рамках модели упругого линейного изотропного основания получить формулы для коэффициентов влияния матрицы податливости для трех - и четырехугольных граничных элементов, а также для граничных элементов в виде кольцевого сектора [1, 2, 3].

Задача решалась в рамках расчетной схемы основания в виде слоя конечной толщины.

В рамках расчетной схемы полупространства эта проблема решена авторами [2, 3, 4].

Указанный набор граничных элементов позволяет определить напряженно – деформированное состояние грунтового основания фундаментов с практически произвольной формой подошвы.

Задача исследований была сформулирована так.

Граничный элемент площадью  $D$  находится на грунтовом слое конечной толщины  $H$ , которое характеризуется упругими техническими константами  $E$  и  $\nu$  (или упругими константами Ламе  $\lambda$  и  $G$ ) [1, 5].

Требуется определить коэффициенты влияния матрицы податливости  $B_{ij}$  для граничных элементов в виде четырехугольника, треугольника и кольцевого сектора.

По определению [1] под коэффициентом влияния понимают осадку точки основания с координатами  $(x_j, y_j)$ , обусловленной распределенной по площади некоторой геометрической фигуры (т.е. либо четырехугольника, либо тре-