

**В.П. НАДУТЫЙ**, д-р техн. наук,  
**П.В. ЛЕВЧЕНКО, В.В. СУХАРЕВ**

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики НАН Украины)

## **МОДЕЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА ОТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

Вибрационное грохочение минерального сырья имеет очень широкое распространение в различных отраслях промышленности, таких как горная, строительная, металлургическая, химическая, а также при переработке техногенного сырья. На всех этих предприятиях эксплуатируется множество различных по конструкциям и режимам работы вибрационных грохотов, адаптация к разнообразным условиям работы которых, как правило, отсутствует. Применение виброгрохотов с возможностью варьирования режимными и конструктивными параметрами в больших диапазонах позволит расширить область их использования, а также повысить технологические показатели в конкретных условиях эксплуатации. Кроме этого, при проектировании новых конструкций виброгрохотов следует опираться на такие требования как снижение металло- и энергоемкости, занимаемых площадей, а также повышение долговечности рабочих органов.

В Институте геотехнической механики НАН Украины авторами разработана конструкция вертикального вибрационного грохота (ВВГ) [1], которая имеет массу в 1,3 т при 3,2 м<sup>2</sup> просеивающей поверхности и виброприводом мощностью 0,74 кВт.

На начальном этапе испытаний экспериментального образца ВВГ были определены целевые функции и варьируемые параметры, а для уменьшения затрат времени и ресурсов на проведение исследований они были спланированы методом планирования эксперимента [2].

В работах [3-5] авторами определено влияние конструктивных и режимных параметров ВВГ на его производительность и эффективность классификации.

*Целью проводимых исследований* является идентификация зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от его конструктивных параметров.

Для определения производительности ВВГ при варьировании его конструктивными параметрами была выполнена серия экспериментов [5]. При этом объем экспериментальных измерений составил 109 наблюдений. При проведении исследований в качестве конструктивных (варьируемых) параметров были приняты следующие:

- угол наклона просеивающей поверхности ( $\alpha$ , град.);
- длина просеивающей поверхности ( $L$ , м);

## Підготовчі процеси збагачення

- пропускная способность бункера-питателя ( $q$ , т/ч);
- размер ячейки сита ( $d$ , мм).

Диапазон значений варьируемых параметров представлен в табл. 1.

Таблица 1

Диапазон значений варьируемых конструктивных параметров ВВГ				
Параметр	$\alpha$ , град.	$L$ , м	$q$ , т/ч	$d$ , мм
Диапазон значений параметра	4-12	0,8-6,4	0,5-2	2-5

При проведении экспериментальных исследований варьировался один из параметров при фиксированных значениях других, а затем эксперименты повторялись при других значениях фиксированных переменных. Такой подход позволил провести как парный регрессионный анализ, для установления вида зависимости производительности грохота от конкретного конструктивного параметра, так и множественный – для разработки обобщенной модели работы ВВГ, в которой учтено взаимное влияние конструктивных параметров на производительность грохота.

*Зависимость производительности ВВГ от длины просеивающей поверхности.* В ходе эксперимента, кроме длины сита, варьировался угол его наклона ( $\alpha$ ), нагрузка на грохот ( $q$ ) и размер ячейки сита ( $d$ ). Объем выборки составил 80 измерений. Были опробованы две модели: линейная по длине просеивающей поверхности и параболическая. Вторая модель показала большую достоверность и адекватность по сравнению с линейной, но коэффициент при переменной  $L$  имел низкую значимость ( $t_\alpha = 0,164$ ) и был исключен из уравнения. После чего был произведен повторный расчет модели, которая в итоге приняла вид:

$$Q = -0,024 + 0,061 \cdot d + 0,038 \cdot \alpha + 0,29 \cdot q - 0,009 \cdot L^2,$$

в которой все коэффициенты регрессии значимые, так как статистика Стьюдента ( $t_L = 31,24$ ,  $t_\alpha = 18,69$ ,  $t_d = 10,39$  и  $t_q = 26,42$ ) значительно больше его табличного значения при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Коэффициент детерминации составил:  $R^2 = 0,966$ , а адекватность модели подтверждена статистикой Фишера  $F = 528$ , которая на порядок больше его критического значения.

Для получения уравнения индивидуального влияния длины просеивающей поверхности на производительность грохота, остальные параметры принимались в виде средних экспериментальных значений ( $\alpha = 8$  град.,  $d = 3$  мм,  $q = 1,5$  т/ч), и была получена такая статистическая модель:

$$Q = 0,898 - 0,009 \cdot L^2.$$

Графически зависимость производительности ВВГ от длины просеивающей поверхности при различных комбинациях параметров представлена на рис. 1, из которого видно, что производительность слабонелинейно уменьшается по мере увеличения проходимого материалом расстояния по рабочему органу.

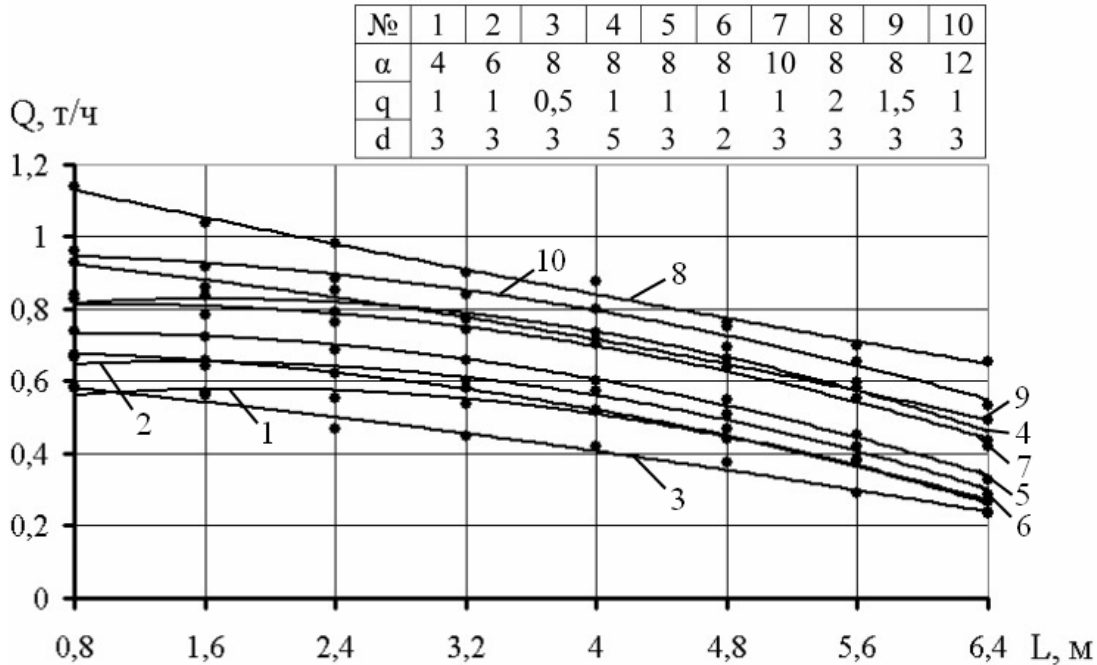


Рис. 1. Залежність продуктивності ВВГ від довжини просеиваючої поверхності

*Залежність продуктивності ВВГ від угла наклона просеиваючої поверхності.* Было проведено 65 наблюдений, при которых изменялась длина просеивающей поверхности ( $L$ ), нагрузка на грохот ( $q$ ) и размер ячейки сита ( $d$ ). При расчете квадратичной зависимости была получена большая достоверность и адекватность модели, чем у линейной, но из-за низкой значимости коэффициента при  $\alpha$  ( $t_{\alpha} = 0,17$ ) он исключался из модели:

$$Q = 0,158 + 0,28 \cdot q - 0,064 \cdot L + 0,077 \cdot d + 0,02 \cdot \alpha^2.$$

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,957$  и статистика Фишера  $F = 331,6$  подтверждают адекватность модели, коэффициенты которой значимы ( $t_L = 18,67$ ,  $t_d = 9,54$ ,  $t_q = 18,562$  и  $t_{\alpha^2} = 22,71$ ).

При расчете парной регрессии при  $L = 3,2$  м,  $d = 3$  мм,  $q = 1,5$  т/ч получена следующая зависимость:

$$Q = 0,604 + 0,02 \cdot \alpha^2.$$

Данная зависимость показана в виде графиков при различных вариациях параметров на рис. 2. Здесь прослеживается слабонелинейный рост продуктивности при увеличении угла наклона просеивающей поверхности.

## Підготовчі процеси збагачення

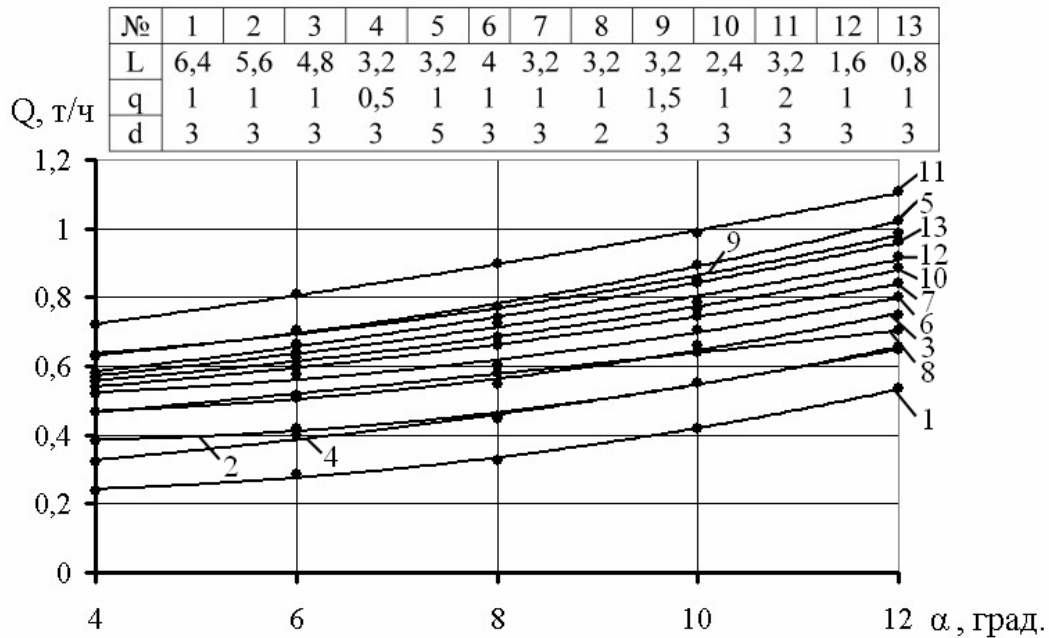


Рис. 2. Залежність продуктивності ВВГ від кута нахилу просіваючої поверхні

*Залежність продуктивності ВВГ від пропускної спроможності бункера-питателя.* Проведено 56 вимірювань, в ході яких крім навантаження на грохот варіювалися  $L$ ,  $d$  і  $\alpha$ . Отримана наступна регресійна залежність:

$$Q = -0,101 + 0,407 \cdot q - 0,075 \cdot L + 0,09 \cdot d + 0,042 \cdot \alpha - 0,043 \cdot q^2.$$

Статистичні характеристики:  $R^2 = 0,974$ ,  $F = 377,3$ ,  $t_L = 20,84$ ,  $t_d = 10,72$ ,  $t_\alpha = 14,19$  і  $t_{q^2} = 2,14$ .

Парна регресія відносно  $q$  при середніх значеннях факторів:

$$Q = 0,055 + 0,407 \cdot q - 0,043 \cdot q^2.$$

Графіки даної залежності, представлені на рис. 3, показують, що з підвищенням пропускної спроможності бункера-питателя на грохот слабонелінійно збільшується і продуктивність ВВГ.

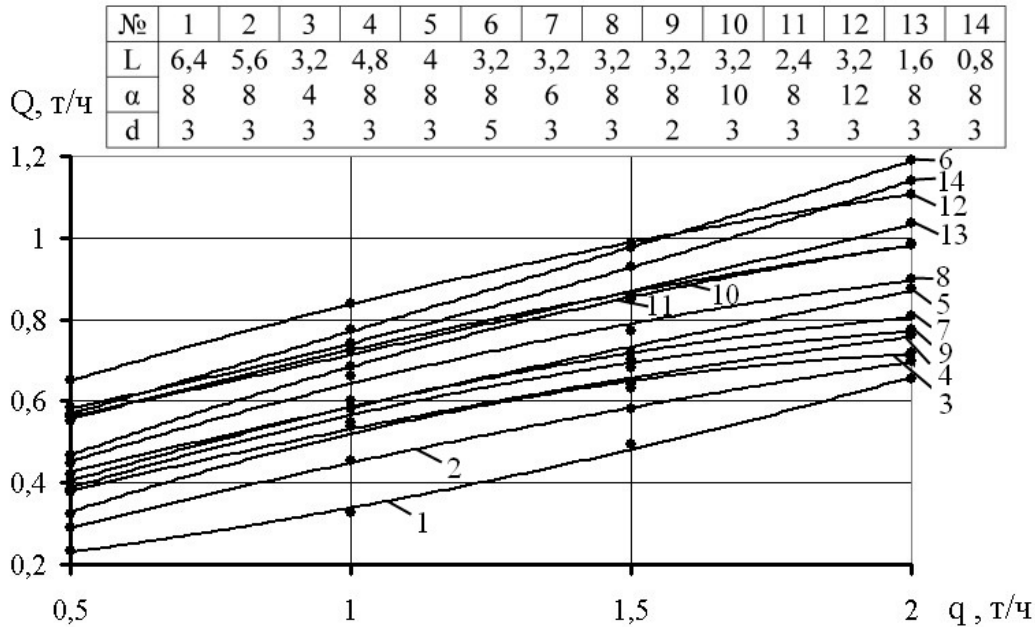


Рис. 3. Зависимость производительности ВВГ от пропускной способности бункера-питателя

*Зависимость производительности ВВГ от размера ячейки просеивающей поверхности.* В расчет линейной модели входило 45 измерений, при изменении параметров  $L$ ,  $q$ ,  $\alpha$ , и полученная регрессионная зависимость имеет вид:

$$Q = 0,004 + 0,317 \cdot q - 0,07 \cdot L + 0,074 \cdot d - 0,039 \cdot \alpha .$$

Коэффициенты регрессии значимы ( $t_L = 12,36$ ,  $t_d = 11,99$ ,  $t_\alpha = 8,2$  и  $t_q = 12,7$ ), коэффициент детерминации  $R^2 = 0,931$ , статистикой Фишера  $F = 134$  подтверждает адекватность выбранной регрессионной зависимости, так как превышает критическое значение. При расчете параболической зависимости коэффициент при  $d^2$  исключался из уравнения из-за низкой значимости ( $t_{d^2} = 0,35$ ).

Индивидуальная регрессия относительно размера ячейки сита при  $L = 3,2$  м,  $q = 1$  т/ч и  $\alpha = 8$  град. следующая:

$$Q = 0,405 + 0,074 \cdot d .$$

Зависимости производительности ВВГ от размера ячейки сита показаны на рис.4, из которого заметно, что производительность грохота увеличивается прямопропорционально размеру ячейки просеивающей поверхности в диапазоне варьруемых параметров.

Для определения обобщенной зависимости производительности ВВГ от его конструктивных параметров, методом наименьших квадратов [6] с применением программного комплекса SPSS Statistics, регрессионная зависимость за-

## Підготовчі процеси збагачення

давалась в виде полинома второй степени содержащего парные произведения переменных. Данная методика описана в работе [2], а зависимость имеет следующий вид:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + \dots + a_n \cdot x_n + b_1 \cdot x_1^2 + \dots + b_n \cdot x_n^2 + c_1 \cdot x_1 \cdot x_2 + c_2 \cdot x_1 \cdot x_3 + \dots + c_k \cdot x_{n-1} \cdot x_n,$$

где  $y$  – функция отклика;  $a_0$  – свободный член;  $a_n \cdot x_n$ ,  $b_n \cdot x_n^2$  – линейные и квадратичные слагаемые;  $c_k \cdot x_{n-1} \cdot x_n$  – парные произведения факторов.

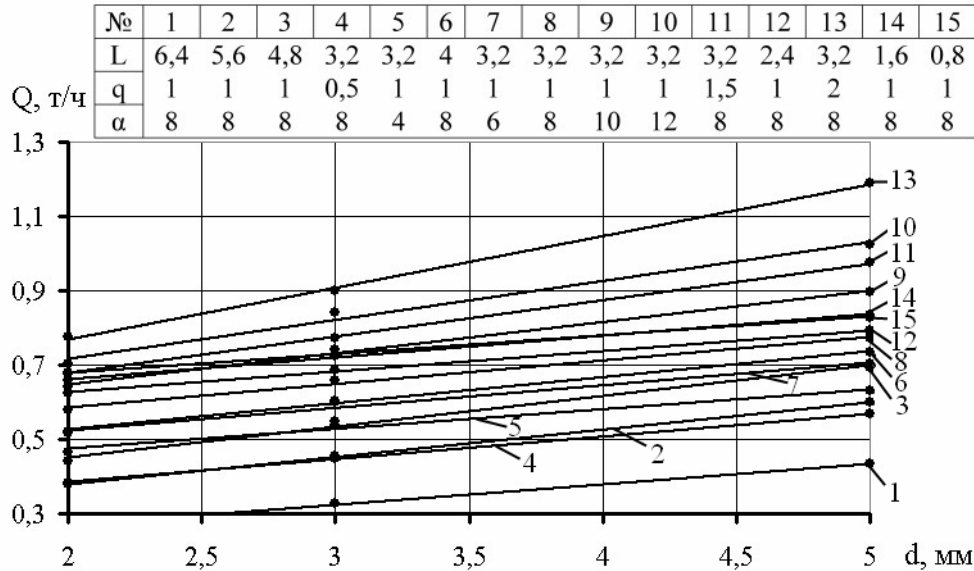


Рис. 4. Зависимость производительности ВВГ от размера ячейки просеивающей поверхности

В пакет обработки данных SPSS Statistics входит функция "Исключение", позволяющая при расчете исключать независимые факторы, коэффициенты надежности (Стьюдента) которых меньше их критического значения. Данная процедура работает в цикле программы до тех пор, пока в уравнение не будут входить только значимые регрессионные коэффициенты [7]. При расчете модели (объем выборки составил 109 измерений) была получена статистическая модель:

$$Q = 0,111 + 0,029 \cdot L + 0,309 \cdot q - 0,002 \cdot \alpha \cdot L + 0,006 \cdot \alpha \cdot d - 0,017 \cdot L \cdot q + 0,061 \cdot d \cdot q + 0,002 \cdot \alpha^2 - 0,008 \cdot L^2 - 0,005 \cdot d^2 - 0,057 \cdot q^2$$

Высокие коэффициент детерминации  $R^2 = 0,984$  и статистика Фишера  $F = 596,4$  подтверждают адекватность принятой модели экспериментальным данным ( $F > F_{\text{табл}} = 2,59$  при степенях свободы  $v_1 = 98$  и  $v_2 = 10$ ). Расчетные коэффициенты надежности коэффициентов регрессии представлены в табл. 2 ( $t_{\text{табл}} = 1,98$ ).

Коефіцієнти надійності коефіцієнтів регресії										
Переменная	$L$	$q$	$\alpha L$	$\alpha d$	$Lq$	$dq$	$\alpha^2$	$L^2$	$d^2$	$q^2$
$t_{rasch}$	2,86	6,9	2,78	4,03	3,88	6,59	6,19	9,32	2,76	4,56

**Выводы**

Изменение конструктивных параметров вертикального вибрационного грохота позволяет его применять в разнообразных технологических схемах переработки минерального сырья в качестве регулирующего и управляющего звена.

В ходе проведенных исследований получена обобщенная математическая модель, в виде нелинейной регрессионной зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от его конструктивных параметров, с высокой точностью и адекватностью экспериментальным данным.

Полученная модель позволяет прогнозировать рациональные показатели работы грохота в условиях его эксплуатации, а также оптимизировать технологический процесс грохочения в целом.

**Список литературы**

1. Пат. № 53632 UA, МПК<sup>8</sup> В 07 В 1/40 (2006.01). Вертикальний вібраційний грохот / Надутый В.П., Левченко П.В., Кіжло Л.А.; заявник і патентовласник ІГТМ НАНУ; Заявл. 26.04.2010; Опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19. – 3 с.
2. **Надутый В.П., Сухарев В.В., Левченко П.В.** Определение целевых функций и варьируемых параметров процесса грохочения на вертикальном вибрационном грохоте // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2011. – Вип. 92. – С. 120–125.
3. **Надутый В.П., Левченко П.В.** Определение зависимости эффективности грохочения от конструктивных параметров вертикального вибрационного грохота // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 45 (86). – С. 43–48.
4. **Франчук В.П., Надутый В.П., Левченко П.В.** Определение зависимости эффективности грохочения от режимных параметров вертикального вибрационного грохота // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2011. – Вып. 2(62). – С. 73-76.
5. **Надутый В.П.** Результаты экспериментальных исследований зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от его конструктивных параметров/ В.П. Надутый, П.В. Левченко// Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Укр. міжвід. наук.-техн. зб. держ. ун-ту "Львівська політехніка". – Львів. – 2011. – Вип. 45. – С. 24-27.
6. **Грушко И.М., Сиденко В.М.** Основы научных исследований. 3-е изд., перераб. и доп. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. Ун-те, 1983. – 224 с.
7. **Бююль А., Цефель П.** SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. – СПб.: ООО "ДиасофтЮП", 2005. – 608 с.

© Надутый В.П., Левченко П.В., Сухарев В.В., 2011

*Надійшла до редколегії 10.09.2011 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. В.П. Франчуком*