



Надуть В. П.

Левченко П. В.

*Институт  
геотехнической  
механики  
им. Н. С. Полякова  
НАН Украины*

УДК 622.74: 621.928.235

## РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА ОТ КОМПЛЕКСА ВАРЬИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

*На підставі отриманих раніше експериментальних даних розроблена узагальнена залежність ефективності класифікації вертикального вібраційного грохоту від конструктивних та режимних параметрів, а також характеристик гірської маси.*

*Being based on received early experimental data the generalised dependence of classification efficiency of vertical vibrating screen from constructive and mode parameters, and also characteristics of mined rock is developed.*

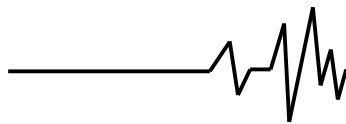
**Введение.** Процесс разделения минерального сырья по крупности широко применяется в горной, металлургической, химической, фармацевтической промышленности, при переработке строительных и бытовых отходов и др. Машины данной технологической операции – вибрационные грохоты, позволяют извлекать товарные классы крупности материала или классы с максимальным содержанием ценного компонента, при этом снижая нагрузку на дробильное и измельчительное оборудование, а соответственно их энергозатраты.

В связи с увеличением переработки низкосортного сырья и техногенных отходов, возникла задача совершенствования вибрационных грохотов, направленная на повышение их технологических показателей, снижение энерго- и металлоемкости, а также уменьшение эксплуатационных затрат.

Одним из путей решения данной задачи является разработанная в Институте геотехнической механики НАН Украины конструкция вертикального вибрационного грохота (ВВГ) [1]. В отличие от распространенных в промышленности плоских горизонтальных грохотов с круговыми, эллиптическими либо направленными

колебаниями рабочего органа, в ВВГ реализуются пространственные колебания просеивающей поверхности. При этом материал на сите быстрее перемешивается, сегрегирует и просеивается. В качестве рабочего органа машины применяются резонирующие ленточно-струнные сита (РЛСС), которые обладают рядом преимуществ по сравнению с стальными, ткаными или полиуретановыми ситами, такими как: высокий срок службы, износостойкость, способность самоочищаться и высокая динамическая активность при работе в резонансном режиме с виброприводом.

Для детального изучения конструкции ВВГ определены основные факторы, оказывающие существенное влияние на технологические показатели машины – производительность ( $Q$ ,  $m^3/h$ ) и эффективность классификации ( $E$ , %), которые выбраны в качестве функции цели [2]. На следующем этапе авторами был выполнен комплекс экспериментальных исследований по определению зависимости эффективности грохочения от конструктивных и режимных параметров машины, а также свойств грохотимой горной массы [3-5]. При этом варьировался один из параметров отдельной



группы факторов при фиксированных значениях других, а затем эксперименты повторялись при других значениях фиксированных переменных. Такой подход позволил установить с высокой достоверностью характер и количественную оценку частного влияния каждого фактора, в виде регрессионных уравнений, путем аппроксимации полученных зависимостей [6-8]. Кроме этого, в последующих работах [9-11] было определено взаимное влияние варьируемых факторов на эффективность классификации. Выполненный объем экспериментальных исследований позволяет разработать обобщенную регрессионную зависимость технологических показателей грохота от всех доминирующих факторов и их комбинаций, которая послужит в определении рациональных и оптимальных параметров машины и адаптации ее к конкретным условиям эксплуатации.

**Целью исследований** является разработка обобщенной модели зависимости эффективности классификации ВВГ от основных конструктивных и режимных параметров, а также характеристик минерального сырья.

При проведении экспериментальных исследований в качестве переменных факторных признаков, оказывающих доминирующее влияние на показатели процесса грохочения, приняты следующие:

- длина просеивающей поверхности  $L$ , м (0,8...6,4);
- угол наклона рам просеивающей поверхности  $\alpha$ , град.(4...12);
- размер ячейки классифицирующего сита  $d$ , мм (2; 3; 5);
- пропускная способность бункера-питателя  $q$ , т/ч (0,5...2);
- амплитуда колебаний грохота  $A$ , мм (1...4);
- частота вращения вала вибровозбудителя  $\omega$ , об/мин (1300...2100);
- угол установки вибровозбудителей относительно вертикали  $\beta$ , град.(0...90);
- процентное содержание подрешётного класса в исходном продукте  $\gamma$ , % (20...60);
- плотность горной породы  $\rho$ , г/см<sup>3</sup> (1,4; 2; 2,6; 4,9);
- влажность материала  $W$ , % (0...15).

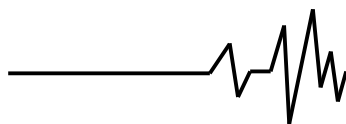
Обобщенную регрессионную модель зависимости эффективности грохочения  $E$ , % (функция отклика) от всех вышеперечисленных факторов получали на основании выполненных исследований, с общим объемом статистических данных  $n = 601$ , в следующем виде:

$$E = a_0 + \sum_i^n a_i \cdot x_i + \sum_i^n a_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j,$$

где  $E$  – функция отклика;  $a_0$  – свободный член уравнения;  $a_i \cdot x_i$ ,  $a_{ii} \cdot x_i^2$  – линейные и квадратичные слагаемые в виде произведений коэффициентов регрессии  $a_i$  на факторы  $x_i$ ;  $a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$  – слагаемые парных произведений факторов;  $n = 10$  – число переменных факторов. Общее количество слагаемых уравнения регрессии составило  $m = 66$ . 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 ( $E$ ), пошагово включаются в регрессионное уравнение [12]. 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 результивный признак  $E$ . По знаку коэффициента регрессии  $a_i$  можно определить влияния соответствующего фактора  $x_i$  на эффективность грохочения: положительный знак свидетельствует о возрастании функции  $E$  при увеличении фактора  $x_i$ , отрицательный – о снижении, а абсолютное значение коэффициента  $a_i$  показывает, на сколько измениться результивный признак при изменении соответствующего фактора на единицу.

В результате расчета обобщенная регрессионная зависимость эффективности грохочения от десяти варьируемых факторов получена в общем виде:

$$\begin{aligned} E = & a_0 + a_1 \cdot L + a_2 \cdot q + a_3 \cdot \omega + a_4 \cdot L^2 + a_5 \cdot q^2 + a_6 \cdot \omega^2 + a_7 \cdot \alpha^2 + a_8 \cdot \beta^2 + a_9 \cdot \rho^2 + \\ & + a_{10} \cdot W^2 + a_{11} \cdot L \cdot A + a_{12} \cdot L \cdot \omega + a_{13} \cdot L \cdot \gamma + a_{14} \cdot L \cdot \rho + a_{15} \cdot L \cdot W + a_{16} \cdot q \cdot A + \\ & + a_{17} \cdot q \cdot \omega + a_{18} \cdot q \cdot \gamma + a_{19} \cdot q \cdot W + a_{20} \cdot \alpha \cdot \omega + a_{21} \cdot d \cdot \beta + a_{22} \cdot A \cdot \omega + \\ & + a_{23} \cdot A \cdot \gamma + a_{24} \cdot A \cdot W \end{aligned}$$



Данная регрессионная зависимость с высоким уровнем адекватности описывает полученные экспериментальные данные, что подтверждает расчётная статистика Фишера  $F = 239,3$ . Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,909$  показывает, что изменчивость функции  $E$  на 90,9 % объясняется влиянием учтённых в модели факторов. Общее

количество учтенных в модели переменных  $m = 24$ . Коэффициенты регрессии и их статистика, представленные в табл.1, превышают критическое значение Стьюдента  $t_{tabl} = 1,96$  при степени свободы  $\nu = n - m - 1 = 576$  и уровне значимости  $\alpha = 0,05$  [13].

Таблица 1

Расчётные значения коэффициентов регрессии и их надёжности

Коэффициент	Значение	$t_{расч}$	Коэффициент	Значение	$t_{расч}$
$a_0$	30,555	-	$a_{13}$	0,0612	3,86
$a_1$	10,1179	6,41	$a_{14}$	-0,6392	3,81
$a_2$	18,0718	3,77	$a_{15}$	0,2295	8,49
$a_3$	0,0609	5,27	$a_{16}$	2,4844	3,98
$a_4$	-1,8484	32,62	$a_{17}$	-0,0082	3,77
$a_5$	-2,2202	2,21	$a_{18}$	-0,1915	5,54
$a_6$	-0,00002	5,93	$a_{19}$	-0,2588	4,09
$a_7$	0,0623	2,46	$a_{20}$	-0,0013	4,93
$a_8$	-0,0005	3,67	$a_{21}$	0,0393	9,78
$a_9$	0,4768	5,58	$a_{22}$	-0,0058	6,04
$a_{10}$	-0,0218	3,15	$a_{23}$	-0,0642	2,36
$a_{11}$	0,9678	4,25	$a_{24}$	-0,1708	3,35
$a_{12}$	0,0037	4,7			

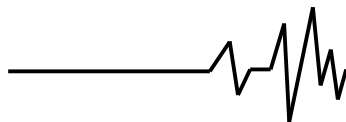
В табл. 2, при разных комбинациях факторных признаков, приведены для сравнения расчетные и экспериментальные значения эффективности грохочения, которые

достаточно хорошо согласуются между собой, тем самым подтверждая адекватность полученной обобщенной зависимости.

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных значений эффективности классификации

$L, м$	$q, т/ч$	$d, мм$	$\alpha, град$	$A, мм$	$\omega, об/мин$	$\beta, град$	$\gamma, \%$	$\rho, г/см^3$	$W, \%$	$E_{экс}, \%$	$E_{расч}, \%$
0,8	2	3	8	2	2100	45	38	2,6	0	45,8	44,99
0,8	2	3	8	2	1500	45	38	2,6	6	61	62,72
3,2	2	3	8	4	1500	45	60	2	0	77,5	77,62
3,2	2	3	8	2	1500	0	38	2	15	79,2	82,35
3,2	2	3	8	2	1500	0	50	2	0	85,7	85,35
3,2	2	3	8	2	1500	45	60	1,4	0	85,6	86,77
3,2	0,5	3	8	3	1500	45	38	2,6	0	89,1	89,82
3,2	2	3	4	2	1700	45	38	2,6	0	94,8	95,15
3,2	2	2	8	2	1500	45	38	4,9	0	95,9	95,29
6,4	2	3	8	2	1300	45	38	2,6	0	99,7	95,68



Полученное многофакторное регрессионное уравнение отражает влияние десяти доминирующих факторов на эффективность классификации ВВГ. Данная зависимость позволяет определить степень влияния каждого из факторов  $x_i$  на результативный признак  $E$  [13]. Для этого найдем приращение  $\delta$  функции  $E(x_i)$  при увеличении фактора  $x_i$  на единицу относительно его среднего арифметического

значения:  $\bar{L} = 3,283$ ;  $\bar{q} = 1,875$ ;  $\bar{d} = 3,04$ ;  $\bar{\alpha} = 7,98$ ;  $\bar{A} = 2,11$ ;  $\bar{\omega} = 1553,245$ ;  $\bar{\beta} = 44,85$ ;  $\bar{\gamma} = 38,02$ ;  $\bar{\rho} = 2,477$ ;  $\bar{W} = 2,426$ . Результаты расчета приведены в табл. 3, из которой следует, что увеличение длины просеивающей поверхности на 1 м приводит к увеличению эффективности грохочения на 5,222 %, а пропускной способности бункера-питателя на 1 т/ч – к уменьшению на 7,877 %.

Таблица 3

Приращение эффективности грохочения от каждого фактора

Функция	$E(\bar{L})$	$E(\bar{q})$	$E(\bar{d})$	$E(\bar{\alpha})$	$E(\bar{A})$	$E(\bar{\omega})$	$E(\bar{\beta})$	$E(\bar{\gamma})$	$E(\bar{\rho})$	$E(\bar{W})$
$\delta$	5,222	-7,877	1,763	-0,963	-4,028	-0,027	0,074	-0,294	0,74	-0,22

**Выводы.** В ходе проведенных исследований была получена обобщенная математическая модель эффективности классификации вертикального вибрационного грохота, в виде нелинейной регрессионной зависимости, при варьировании основными доминирующими конструктивными и режимными параметрами машины, а также характеристиками горной массы. Расчетная зависимость с высокой точностью и адекватностью описывает полученные ранее экспериментальные данные. Следовательно, она позволяет прогнозировать рациональные показатели машины в условиях ее эксплуатации.

Установлена степень влияния каждого фактора, относительно их средних значений, на эффективность грохочения, которая может быть использована в качестве критерия оптимизации при определении оптимальных параметров работы грохота.

### Литература

1. Пат. № 53632 UA, МПК<sup>8</sup> В 07 В 1/40 (2006.01). Вертикальный вибрационный 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. Определение целевых функций и варьируемых параметров процесса грохочения на вертикальном вибрационном грохоте / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, П.В. Левченко // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2011. – Вип. 92. – С. 120–125.
3. Надутый В.П. Определение зависимости эффективности грохочения от конструктивных параметров вертикального

вибрационного грохота / В.П. Надутый, П.В. Левченко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 45 (86). – С. 43-48.

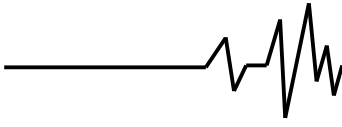
4. Надутый В.П. Влияние характеристик горной массы на эффективность классификации вертикального вибрационного грохота / В.П. Надутый, П.В. Левченко // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2011. – Вип. 93. – С. 81-86.

5. Франчук В.П. Определение зависимости эффективности грохочения от режимных параметров вертикального вибрационного грохота / В.П. Надутый, П.В. Левченко // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2011. – Вып. 2(62). – С. 70-76.

6. Надутый В.П. Идентификация результатов исследований зависимости эффективности грохочения от конструктивных параметров вертикального вибрационного грохота / В.П. Надутый, П.В. Левченко, В.В. Сухарев // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2011. – Вып. 3(63). – С. 73-76.

7. Надутый В.П. Аппроксимация зависимости эффективности классификации минерального сырья на вертикальном вибрационном грохоте от режимных параметров / В.П. Надутый, П.В. Левченко, В.В. Сухарев // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2011. – Вип. 94. – С. 144-150.

8. Надутый В.П. Моделирование зависимости эффективности классификации вертикального вибрационного грохота от характеристик горной массы / В.П. Надутый, П.В. Левченко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 47 (88). – С. 54-61.



9. Надутый В.П. Результаты исследований зависимости эффективности классификации от параметров вертикального вибрационного грохота / В.П. Надутый, П.В. Левченко, И.П. Хмеленко // *Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал.* – Вінниця, 2011. – Вып. 4(64). – С. 45-48.

10. Левченко П.В. Экспериментальное определение зависимости эффективности классификации вертикального вибрационного грохота от комплекса доминирующих факторов / П.В. Левченко // *Науковий вісник НГУ.* – Днепропетровск, 2012. – № 2. – С. 41-46.

11. Надутый В.П. Экспериментальный анализ влияния параметров просеивающей

поверхности и характера загрузки на эффективность виброгрохочения / В.П. Надутый, П.В. Левченко // *Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб.* – 2012. – Вып. 48 (89). – С. 36-43.

12. 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.

13. Кухарев В.Н. Экономико-математические методы и модели в планировании и управлении: Учебник / В.Н. Кухарев, В.И. Салли, А.М. Эрперт. – К.: Выща шк., 1991. – 303с.