

В.П. Надутый, д.т.н., проф.,
П.В. Левченко, инж., асп.
В.В. Сухарев, к.т.н., м.н.с.,
(ИГТМ НАН Украины)

**АППРОКСИМАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
КЛАССИФИКАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ НА
ВЕРТИКАЛЬНОМ ВИБРАЦИОННОМ ГРОХОТЕ ОТ РЕЖИМНЫХ
ПАРАМЕТРОВ**

На основі апроксимації результатів експериментальних досліджень ефективності просівання гірської маси на вертикальному вібраційному грохоті при варіюванні режимними параметрами, отримана узагальнена регресійна модель роботи грохоту.

**APPROXIMATION OF THE DEPENDENCE OF THE
CLASSIFICATION EFFICIENCY OF MINERAL RAW MATERIALS ON
REGIME PARAMETERS OF THE VERTICAL VIBRATING SCREEN**

In the article the generalized regression model of screen work is presented on the basis of the approximation of results of experimental researches of screening mining rock efficiency on a vertical vibrating screen by varying the mode parameters.

Вибрационное грохочение минерального сырья является одной из массовых операций на обогатительных и перерабатывающих предприятиях.

Насчитывается более тысячи различных по конструкциям и режимам работы виброгрохотов, которые эксплуатируются на этих предприятиях. Дальнейшее совершенствование данных машин идет по пути уменьшения металло- и энергоёмкости с повышением их технологических показателей. Кроме этого виброгрохот должен иметь возможность адаптации к разнообразным условиям эксплуатации.

Разработанная в Институте геотехнической механики НАН Украины конструкция вертикального вибрационного грохота (ВВГ) [1] удовлетворяет вышеперечисленные современные требования. За счёт тщательно спроектированной конструкции ВВГ обладает такими характеристиками: масса грохота – 1,3 т, габаритные размеры – 1400x1400x1900, площадь просеивающей поверхности – 3,2м², мощность вибропривода – 0,74 кВт. При этом вибровозбудители располагаются по бокам грохота с возможностью изменения их угла наклона.

Для экспериментального изучения конструкции грохота количество опытов было определено методом планирования эксперимента [2, 3]. В качестве интегральной оценки и целевой функции при поиске рациональных параметров работы ВВГ предложено определять эффективность грохочения (E) и производительность грохота (Q).

Авторами установлено, что на технологические показатели грохота существенно влияют конструктивные и режимные параметры машины [4, 5, 6]. Определение характера этих зависимостей позволит выбрать рациональные или оптимальные параметры работы ВВГ.

Целью работы является аппроксимация результатов экспериментальных исследований зависимости эффективности классификации минерального сырья на вертикальном вибрационном грохоте от его режимных параметров.

Режимные параметры, и пределы их регулирования, были приняты следующие:

- A – амплитуда колебаний короба грохота, мм (1...4);
- ω – частота вращения вала вибровозбудителя, об/мин (1300...2100);
- β – угол направления возмущающей силы, град. (0...90).

Для описания зависимости эффективности классификации от режимных параметров был выполнен парный регрессионный анализ для установления индивидуального влияния каждого из факторов на эффективность, а для общего влияния всех параметров – множественный.

Зависимость эффективности грохочения от амплитуды колебаний грохота (A) определялась на основании 36-ти экспериментальных наблюдений, при которых помимо амплитуды колебаний варьировалась частота вращения вала вибровозбудителя (ω) и угол его наклона (β). Расчётная зависимость имеет вид:

$$E = 144,081 - 3,198 \cdot A - 0,032 \cdot \omega + 0,102 \cdot \beta.$$

Высокий коэффициент детерминации $R^2 = 0,952$ показывает, что 95,2% вариаций E объясняется влиянием учтённых в модели факторов. Статистика Фишера $F = 213,2$ свидетельствует об адекватности регрессионного уравнения экспериментальным данным. Коэффициенты регрессии значимы, т.к. значительно превышают табличное значение Стьюдента ($t_A = 10,09$, $t_\omega = 20,77$ и $t_\beta = 6,675$).

Парная регрессия рассчитывалась при фиксированных параметрах $\omega = 1700$ об/мин и $\beta = 45$ град. Получено следующее уравнение:

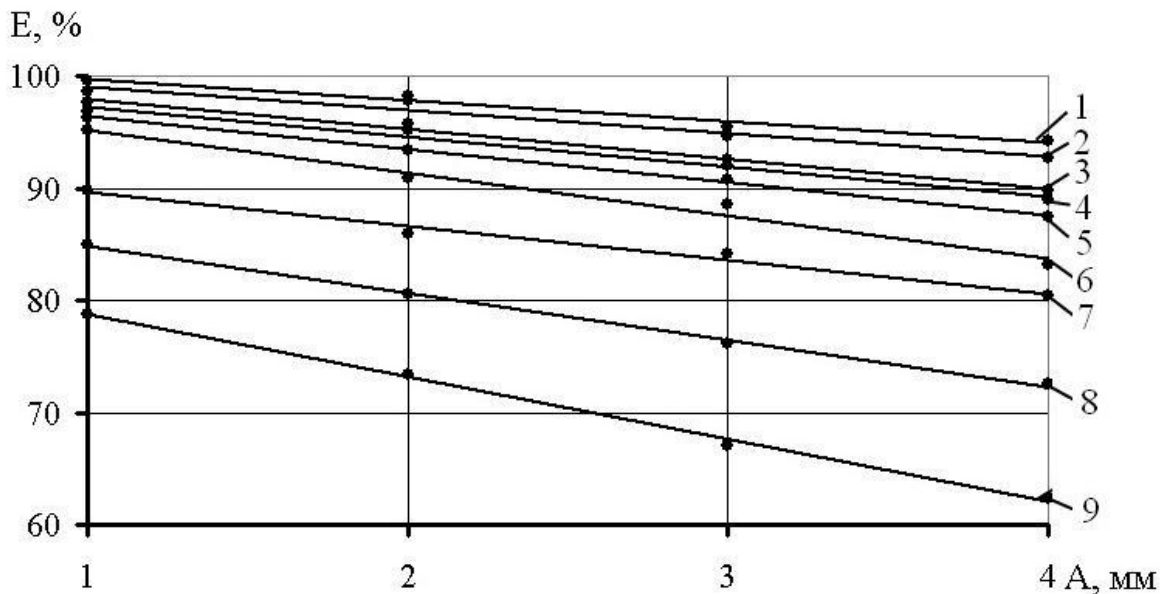
$$E = 94,671 - 3,198 \cdot A.$$

Графически зависимость эффективности классификации от амплитуды колебаний короба грохота при различных вариациях параметров представлена на рис.1, из которого видно, что с увеличением амплитуды прямопропорционально уменьшается эффективность грохочения, за счёт меньшего времени нахождения материала на рабочей поверхности.

При установлении вида зависимости эффективности классификации от частоты вращения вала вибровозбудителя (ω) было проведено 40 измерений с изменением факторов A и β . Получена следующая статистическая модель:

$$E = 87,06 - 3,741 \cdot A + 0,102 \cdot \beta - 0,035 \cdot \omega - 0,0000187 \cdot \omega^2,$$

коэффициент детерминации $R^2 = 0,978$ и статистика Фишера $F = 386,4$, которой подтверждают вид принятой зависимости. Коэффициенты регрессии $t_A = 13,06$, $t_\omega = 2,89$, $t_{\omega^2} = 5,3$ и $t_\beta = 10,63$ превышают табличное значение статистики Стьюдента $t_{tabl} = 2,03$ и являются значимыми.



№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ω	1500	1500	1300	1500	1500	1500	1700	1900	2100
β	90	60	30	45	30	0	30	30	30

Рис.1 – Зависимость эффективности грохочения от амплитуды колебаний грохота

Для установления индивидуального влияния частоты вращения вала вибровозбудителя на эффективность грохочения остальные факторы были приняты на следующих уровнях $A=2$ мм и $\beta=45$ град., и получена такая зависимость:

$$E = 84,168 - 0,035 \cdot \omega - 0,0000187 \cdot \omega^2.$$

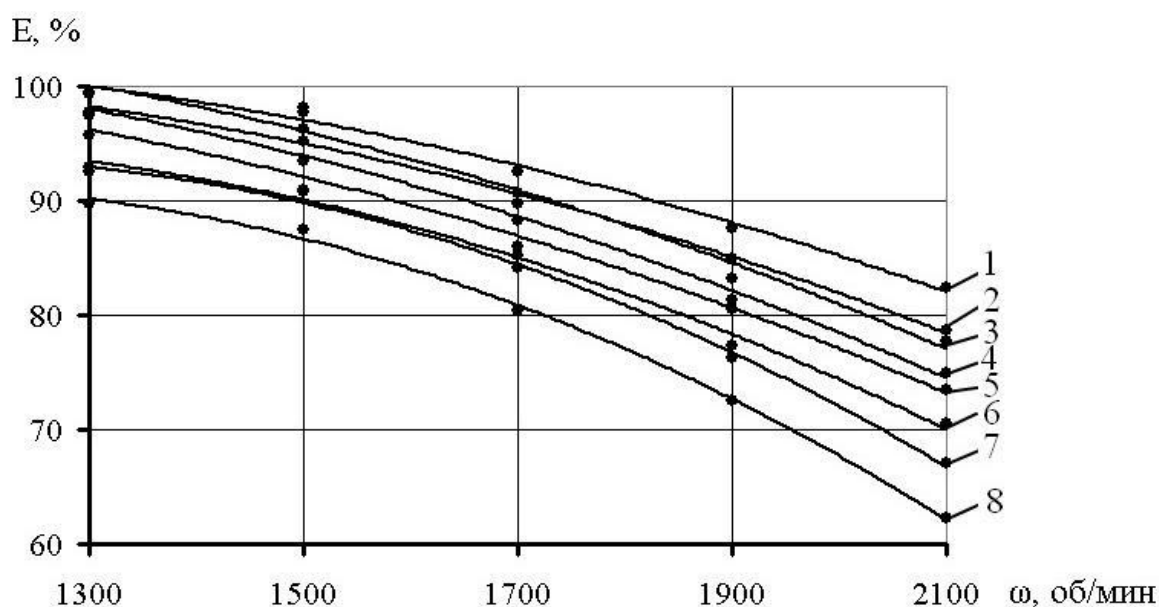
Наглядно данная зависимость при различных значениях факторов изображена на рисунке 2. Здесь наблюдается снижение эффективности грохочения согласно квадратичному закону в исследуемых пределах.

Анализируя экспериментальные данные зависимости эффективности грохочения от угла направления возмущающей силы относительно горизонта (β) при различных вариациях A и ω (объём выборки составил 40 измерений), была предложена линейная модель, т.к. при исследовании параболической зави-

симости коэффициент при β^2 был незначим ($t_{\beta^2} = 0,18$) и исключался из уравнения. Таким образом, получено уравнение:

$$E = 137,367 - 2,344 \cdot A + 0,095 \cdot \beta - 0,029 \cdot \omega.$$

Основные статистические характеристики этой зависимости: коэффициент детерминации $R^2 = 0,959$, статистика Фишера $F = 282,5$, коэффициенты надёжности коэффициентов регрессии: $t_A = 7,42$, $t_\omega = 26,74$ и $t_\beta = 11,02$. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и степенях свободы $\nu_1 = 3$ и $\nu_2 = 36$, табличное значение статистики Фишера $F_{tabl} = 8,6$, которое намного меньше расчётного, свидетельствует об адекватности принятой зависимости экспериментальным данным, а критическое значение статистики Стьюдента $t_{tabl} = 2,03$ доказывает значимость коэффициентов регрессии.



№	1	2	3	4	5	6	7	8
A	2	1	2	2	2	2	3	4
β	90	30	60	45	30	0	30	30

Рис.2 – Зависимость эффективности грохочения от частоты вращения вала вибровозбудителя

При установлении частного влияния параметра β на эффективность грохочения при фиксированных значениях остальных параметров, входящих в модель ($A=2\text{мм}$ и $\omega=1700\text{ об/мин}$), получена статистическая модель:

$$E = 83,379 + 0,095 \cdot \beta.$$

На рисунке 3 в виде графиков представлена зависимость эффективности

классификации от угла направления возмущающей силы при различных вариациях остальных параметров. Из рисунка видно, что функция $E=f(\beta)$ линейно возрастает при увеличении аргумента в пространстве исследуемых значений факторов.

Полученный объём экспериментальных данных (объём выборки составил 53 измерения) позволяет получить обобщённую регрессионную модель эффективности классификации от режимных параметров вертикального вибрационного грохота в исследуемых пределах. Поскольку данная модель позволяет подобрать рациональные параметры работы машины на стадии проектирования или адаптации к конкретным условиям её эксплуатации.

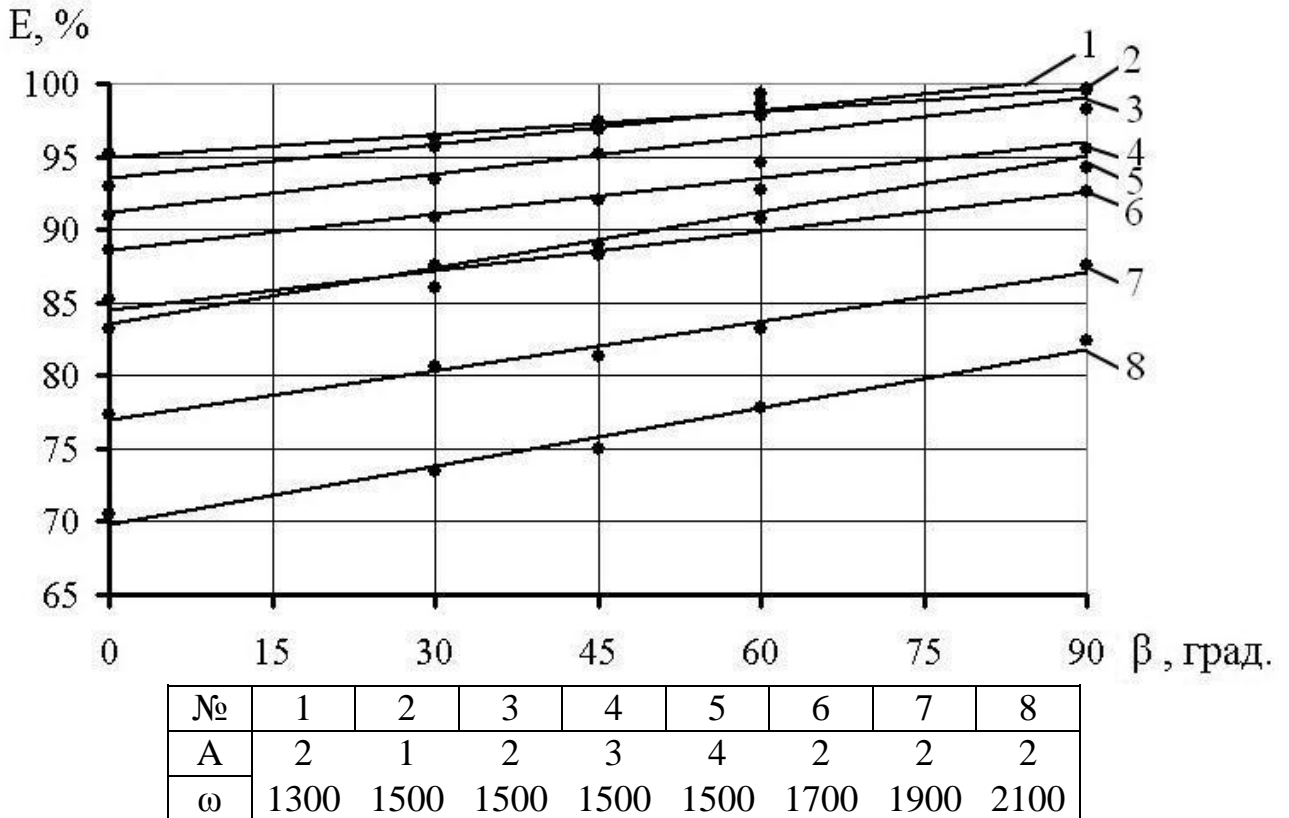


Рис.3 – Зависимость эффективности грохочения от угла направления возмущающей силы

Для анализа получали обобщенную модель в виде регрессионной зависимости второго порядка с учётом взаимного влияния факторов следующего вида:

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

где y – целевая функция (эффективность грохочения). В уравнение входит свободный член a_0 , линейные и квадратичные слагаемые в виде произведе-

ний коэффициентов регрессии a_n на факторы x_n и b_n на x_n^2 соответственно, а также слагаемые, содержащие парные произведения кодированных переменных $c_k \cdot x_{n-1} \cdot x_n$. Расчёт данной модели производился средствами прикладного пакета обработки статистических данных SPSS Statistics с применением встроенной функции “Исключение”. При работе данной опции в начале расчёта включались все слагаемые, а затем исключались произведения с наименьшими частичными корреляционными коэффициентами, и расчёт производился снова в цикле программы до тех пор, пока все входящие в уравнение регрессионные коэффициенты окажутся значимыми [7]. В итоге получена обобщённая математическая модель вида:

$$E = 71,667 + 2,455 \cdot A + 0,047 \cdot \omega - 0,0000204 \cdot \omega^2 - 0,004 \cdot A \cdot \omega + 0,017 \cdot A \cdot \beta + 0,0000385 \cdot \omega \cdot \beta$$

Данная модель адекватно описывает полученные экспериментальные данные, что подтверждает расчётная статистика Фишера $F = 559,2$, которая намного больше своего табличного значения $F_{tabl} = 3,76$ при степенях свободы $\nu_1 = 6$ и $\nu_2 = 46$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,987$ показывает, что изменчивость функции E почти полностью характеризуется разбросом учтённых в модели факторов. Коэффициенты регрессии и их статистика, представленные в табл.1, превышают критическое значение Стьюдента $t_{tabl} = 2,01$.

Таблица 1 – Расчётные значения коэффициентов регрессии и их надёжности

Переменная	A	ω	ω^2	A ω	A β	$\omega\beta$
Коэффициент регрессии	2,455	0,047	0,0000204	-0,004	0,017	0,0000385
t_{rasch}	2,139	5,436	8,046	5,718	2,735	4,325

Выводы. Разработана обобщенная математическая модель зависимости эффективности грохочения горной массы на вертикальном вибрационном грохоте от его режимных параметров в виде регрессионной зависимости второго порядка с учётом взаимного влияния исследуемых параметров. Данная модель показала высокую доверительную вероятность в сравнении с комплексом экспериментальных значений, и позволяет адаптировать машину к условиям эксплуатации путём подбора рациональных или оптимальных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. № 53632 UA, МПК⁸ В 07 В 1/40 (2006.01). Вертикальний вібраційний грохот / Надутий 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. Основы научных исследований. Грушко И.М., Сиденко В.М.– 3-е изд., перераб. и доп.– Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. Ун-те, 1983.–224с.
4. 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.
5. Франчук В.П. Определение зависимости эффективности грохочения от режимных параметров вертикального вибрационного грохота/ В.П. Франчук, В.П. Надутый, П.В. Левченко// Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2011. – Вип. 2(62). – С. 73–76.
6. 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.24–29.
7. 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.