

В.П. НАДУТЫЙ, д-р техн. наук,

П.В. ЛЕВЧЕНКО,

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА ОТ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНОЙ МАССЫ

Введение. При добыче и переработке полезных ископаемых особое место занимает вибрационное грохочение, которое обеспечивает отбор товарного продукта на стадии дробления или измельчения, снижая, таким образом, нагрузку на дробильное и измельчительное оборудование, а соответственно и их энергопотребление.

Несмотря на большое разнообразие, как конструкций, так и режимов работы вибрационных грохотов, дальнейшее их совершенствование непосредственно связано с повышением эффективности классификации и удельной производительности, снижением энерго- и металлоемкости, а также возможностью адаптации машины к конкретным условиям эксплуатации, обеспечивая тем самым универсальность конструкции.

Учитывая современные требования к технологии переработки горной массы, и вибрационному грохочению в частности, в Институте геотехнической механики НАН Украины был разработан вертикальный вибрационный грохот (ВВГ) [1]. При массе машины 1,3 т и габаритных размерах – 1400×1400×1900, площадь просеивающей поверхности составила 3,2 м², а мощность вибропривода всего-навсего 0,74 кВт, что в несколько раз меньше, чем у аналогичных по массе грохотов. При этом во время работы вибровозбудителей, реализуется пространственное колебание рабочей поверхности из резонирующих ленточно-струнных сит, что в свою очередь повышает скорость протекания процессов перемешивания, сегрегации и просеивания, обеспечивая тем самым высокие технологические показатели работы ВВГ.

Для детального изучения влияния конструктивных и режимных параметров на эффективность грохочения (E , %) и производительность машины (Q , т/ч), авторами проведен целый комплекс экспериментальных исследований с их предварительным планированием [2], результаты которых представлены в работах [3-6].

В ходе дальнейших исследований потребовалось установление зависимости эффективности классификации ВВГ от характеристик горной массы, так как они оказывают существенное влияние на эффективность грохочения и являются не регулируемым звеном в процессе грохочения [6].

Целью работы является разработка модели зависимости эффективности грохочения ВВГ от характеристик горной массы.

Основные характеристики горной массы, а также пределы их варьирования

Підготовчі процеси збагачення

в експериментальній роботі були прийняті наступні:

- γ – процентне вміщення подрешетного матеріалу в вихідному продукті, % (20...60);
- ρ – густина гірної маси, г/см³ (1,4; 2; 2,6; 4,9);
- W – вологість матеріалу, % (0...15).

В якості експериментальних матеріалів були представлені наступні гірні породи (клас -10мм): вугілля ($\rho = 1,4$ г/см³), шлаковий ($\rho = 2$ г/см³) і гранітний ($\rho = 2,6$ г/см³) отсеви і залізна руда ($\rho = 4,9$ г/см³).

В ході досліджень варіювалися характеристики гірної маси при постійних значеннях режимних і конструктивних параметрів, які були зафіксовані на наступних рівнях:

- 1) амплітуда коливань грохота $A=2$ мм;
- 2) частота обертання вала вібробудителя $\omega = 1500$ об/хв;
- 3) кут напрямлення збуджуючої сили відносно горизонту $\beta = 45$ градус;
- 4) сумарна довжина просіваючої поверхні $L = 3,2$ м;
- 5) пропускна здатність бункера-підателя $q = 2$ т/хв;
- 6) кут нахилу просіваючої поверхні відносно горизонту $\alpha = 8$ градус;
- 7) розмір комірки РЛСС $d = 3$ мм.

Для встановлення індивідуального впливу кожного з варіюваних факторів на ефективність грохочення (функція відклику) було виконано парний регресійний аналіз, а для загального впливу всіх параметрів – множинний.

Залежність ефективності грохочення (E) від процентного вміщення подрешетного продукту в вихідному матеріалі (γ) ідентифікувалася на основі 45-ти експериментальних спостережень, при яких крім γ варіювалася густина гірної маси (ρ) і її вологість (W). Розрахункова залежність має вигляд:

$$E = 97,584 + 0,629 \cdot \rho - 0,288 \cdot W + 0,132 \cdot \gamma - 0,0058 \cdot \gamma^2.$$

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,979$ моделі свідчить про високу щільність зв'язу між розрахунковими і експериментальними значеннями. Статистика Фішера $F = 473,2$ набагато більше свого табличного значення, отже, модель – адекватна. Коефіцієнти регресії значимі, т.к. значимо перевищують критичне значення статистики Стюдента $t_{tabl} = 2,02$ при рівні значимості $\alpha = 0,95$ ($t_\rho = 4,76$, $t_W = 12,45$, $t_\gamma = 2,22$ і $t_{\gamma^2} = 7,99$).

Парна регресія розраховувалася при фіксованих параметрах $\rho = 2$ г/см³ і $W=6$ %. Отримано наступне рівняння:

$$E = 97,114 + 0,132 \cdot \gamma - 0,0058 \cdot \gamma^2.$$

Підготовчі процеси збагачення

Графічески зависимость эффективности классификации от процентного содержания подрешетного материала в исходном продукте при различных вариациях остальных характеристик горной массы представлена на рис.1, из которого видно, что эффективность грохочения параболически снижается по мере увеличения варьируемого параметра (γ). Данное явление связано, в первую очередь, с повышением скорости протекания процесса сегрегации материала. При этом на поверхности контакта с рабочим органом увеличивается количество зерен материала, что, в свою очередь, приводит к "конкуренции" частиц при просеивании [7].

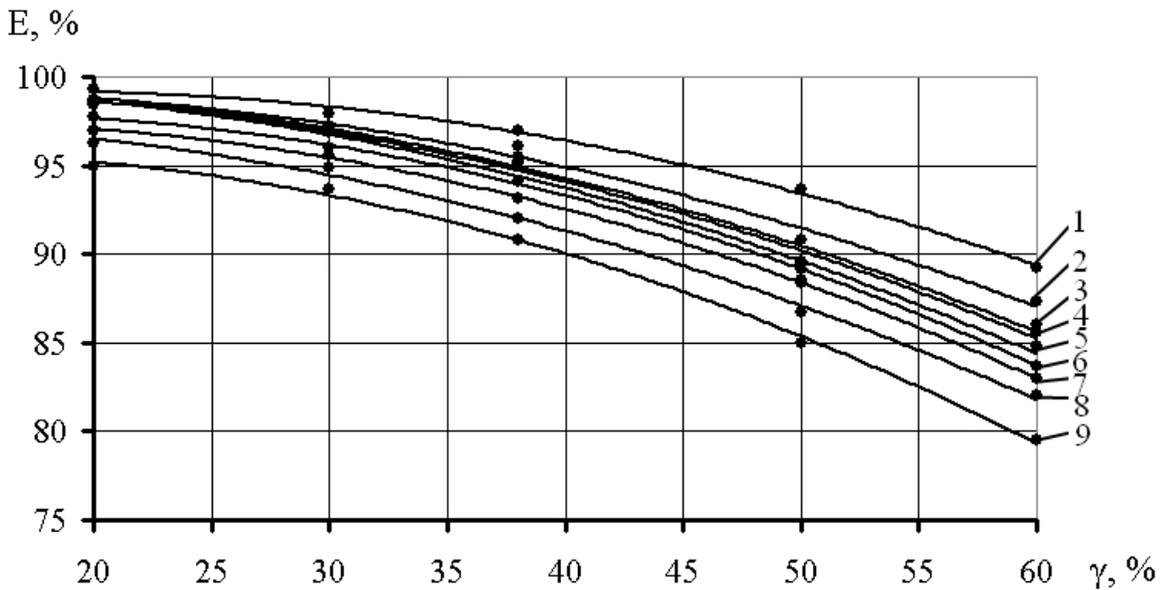


Рис. 1. Зависимость эффективности грохочения от процентного содержания подрешетного продукта в исходном материале:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ρ	4,9	2,6	2	1,4	2	2	2	2	2
W	0	0	0	0	3	6	9	12	15

Зависимость эффективности грохочения (E) от плотности горной массы (ρ). В ходе исследований было получено 40 измерений функции отклика при различных вариациях W и γ . При статистической обработке экспериментальных данных была получена следующая регрессионная зависимость:

$$E = 104,615 - 0,305 \cdot \gamma - 0,199 \cdot W + 0,639 \cdot \rho,$$

коэффициент детерминации $R^2 = 0,917$ и статистика Фишера $F = 132,8$, которой подтверждают вид принятой зависимости. Коэффициенты регрессии $t_\gamma = 18,54$, $t_W = 6,53$ и $t_\rho = 5,15$ превышают табличное значение статистики Стьюдента $t_{tabl} = 2,03$ и являются значимыми. При расчете нелинейной модели относительно ρ коэффициент регрессии при переменной ρ^2 был незначим

Підготовчі процеси збагачення

($t_{\rho^2} = 0,71$) и исключался из уравнения, которое в итоге принимало вид описанный выше.

Для установления индивидуального влияния плотности материала на эффективность грохочения остальные факторы были приняты на следующих уровнях $\gamma = 38\%$ и $W = 6\%$, и получена такая зависимость:

$$E = 91,831 + 0,639 \cdot \rho.$$

Наглядно данная зависимость при различных значениях факторов изображена на рис.2. Здесь наблюдается рост эффективности грохочения с увеличением плотности материала, что обусловлено гравитационными силами.

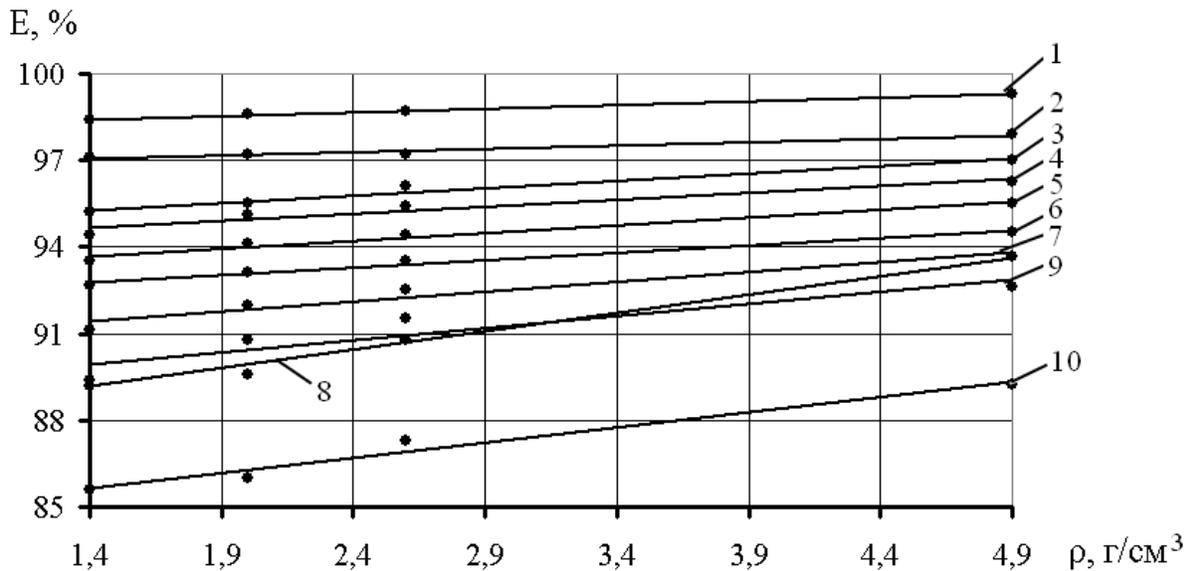


Рис. 2. Зависимость эффективности классификации от плотности материала:

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ	20	30	38	38	38	38	38	50	38	60
W	0	0	0	3	6	9	12	0	15	0

Зависимость эффективности грохочения (E) от влажности материала (W). Объем выборки составил 48 измерений. В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение:

$$E = 106,08 - 0,363 \cdot \gamma + 0,881 \cdot \rho - 0,2 \cdot W^2.$$

Статистические характеристики этой регрессионной зависимости: коэффициент детерминации $R^2 = 0,947$ и статистика Фишера $F = 261,5$ подтверждают адекватность полученной модели экспериментальным данным. Коэффициенты надежности коэффициентов регрессии $t_{\gamma} = 25,44$, $t_{\rho} = 5,52$ и $t_{W^2} = 9,86$ являются значимыми ($t_{tabl} = 2,02$). Из уравнения был исключен коэффициент

Підготовчі процеси збагачення

при переменной W , т.к. он незначим ($t_W = 1,12$) и не оказывает на зависимость большого влияния.

Парная регрессионная зависимость эффективности грохочения от влажности материала при $\gamma = 38\%$ и $\rho = 2 \text{ г/см}^3$ имеет вид:

$$E = 94,048 - 0,2 \cdot W^2.$$

Зависимость эффективности классификации от влажности материала при различных вариациях остальных характеристик горной массы представлена на рис.3. Из рисунка видно, что функция $E=f(W)$ слабонелинейно снижается при увеличении влажности материала.

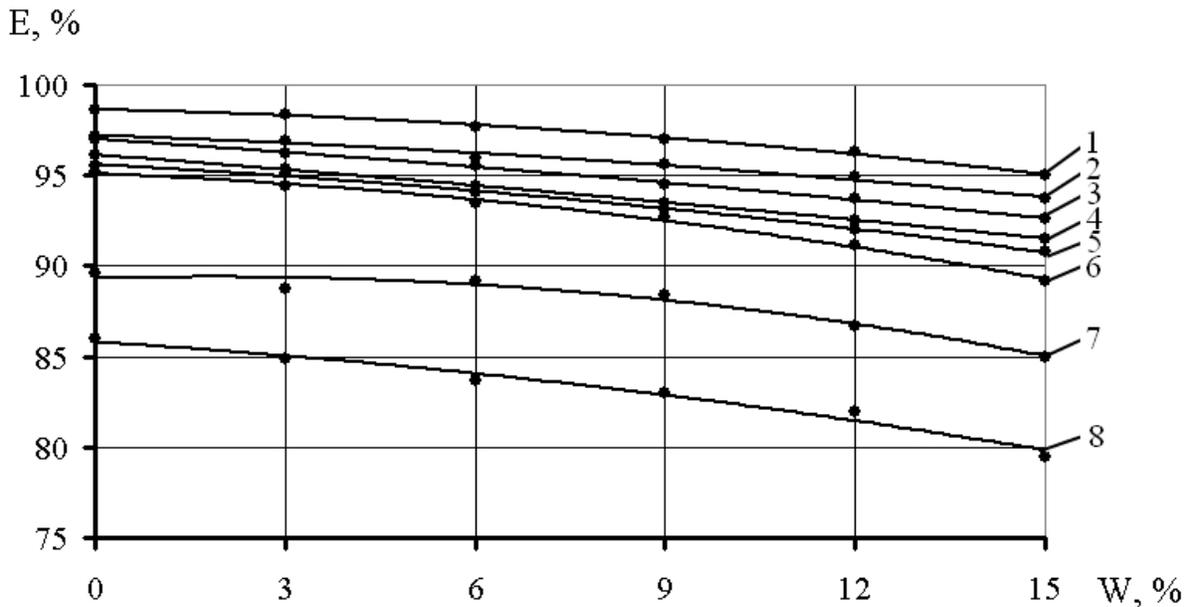


Рис. 3. Зависимость эффективности грохочения от влажности материала:

№	1	2	3	4	5	6	7	8
γ	20	30	38	38	38	38	50	60
ρ	2	2	4,9	2,6	2	1,4	2	2

Для подбора рациональных параметров работы ВВГ в конкретных горно-геологических условиях эксплуатации необходимо разработать математическую модель работы машины в виде обобщенной регрессионной зависимости эффективности классификации от характеристик горной массы. Полученный объем экспериментальных данных из 61 измерения позволяет это реализовать.

При анализе получали обобщенную модель в виде регрессионной зависимости второго порядка с учетом взаимного влияния факторов такого вида [2]:

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

Підготовчі процеси збагачення

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

Расчет зависимости выполнялся средствами прикладного пакета обработки статистических данных SPSS Statistics с применением встроенной функции “Исключение”. При работе данной функции в начале расчета включались все слагаемые уравнения, а затем исключались произведения с наименьшими частичными корреляционными коэффициентами, после чего расчет производился снова в цикле программы. В конечном итоге, все входящие в уравнение регрессионные коэффициенты будут значимыми [8]. Таким образом, получена обобщенная регрессионная зависимость:

$$E = 98,716 + 0,072 \cdot \gamma + 0,029 \cdot \gamma \cdot \rho - 0,004 \cdot \gamma \cdot W - 0,006 \cdot \gamma^2 - 0,073 \cdot \rho^2 - 0,1 \cdot W^2.$$

Полученное регрессионное уравнение с высоким уровнем адекватности и достоверности описывает экспериментальные данные – это подтверждают высокая расчетная статистика Фишера $F = 999,3$ и коэффициент детерминации $R^2 = 0,991$. Коэффициенты регрессии и их статистика, представленные в таблице, превышают критическое значение Стьюдента $t_{tabl} = 2,00$.

Расчетные значения коэффициентов регрессии и их надежности

Переменная	γ	$\gamma \cdot \rho$	$\gamma \cdot W$	γ^2	ρ^2	W^2
Коэффициент регрессии	0,072	0,029	-0,004	-0,006	-0,073	-0,1
t_{rasch}	2,21	6,17	5,93	15,45	2,55	5,06

Выводы

Эффективность классификации горной массы существенно зависит от ее характеристик, оказывающих значительное влияние на процесс. Так увеличение содержания товарного класса в исходном продукте приводит к снижению эффективности просеивания, а плотность частиц, наоборот – к ее росту. Негативное влияние на эффективность классификации оказывает влажность грохотимого материала, которая непосредственно приводит к активизации сил вязкого сцепления частиц материала между собой и их окомкованию. Для последующего разрыхления влажной горной массы и ее успешному прохождению сквозь ячейки сита потребуются высокие ускорения рабочей поверхности или специальный вид ее колебаний.

Разработанная обобщенная регрессионная зависимость эффективности грохочения горной массы от ее характеристик показала высокую достоверную вероятность в сравнении с комплексом экспериментальных данных, и позволяет адаптировать машину к условиям эксплуатации путем подбора ее рациональных или оптимальных параметров.

Список літератури

1. Пат. № 53632 UA, МПК⁸ 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. 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. 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. – 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" – 2011. – Вип. 45. – С. 24–29.
6. 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.
7. Вероятностные процессы вибрационной классификации минерального сырья/ Надутый В.П., Лапшин Е.С. – К.: Наук. думка, 2005. – 179 с.
8. 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., 2011

*Надійшла до редколегії 11.11.2011 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Є.С. Лапшиним*