

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

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

РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННОЙ РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОТА ОТ ВАРЬИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Введение. Операция вибрационного грохочения имеет широкое распространение в горном, металлургическом, химическом и других производствах независимо от вида перерабатываемого сырья. Производительность и эффективность этого процесса в существенной мере определяет качество и себестоимость продукции, поэтому не случайно внимание многих исследователей направлено на его совершенствование. Для обеспечения высокой производительности грохочение производят толстым слоем в режиме с подбрасыванием, при котором классификация происходит в результате сегрегации, просеивания и вибротранспортирования материала. Однако следует отметить, что в процессе грохочения изменяется высота слоя, а это существенно сказывается на всех трех вышеперечисленных составляющих.

Учитывая многолетний опыт проектирования, создания и эксплуатации вибрационных машин различного технологического назначения, а также многочисленные исследования в области вибрационной классификации, в Институте геотехнической механики НАН Украины разработана конструкция вертикального вибрационного грохота (ВВГ) [1]. Рабочий орган машины представляет собой нисходящую наклонную спираль из рам с просеивающей поверхностью в виде резонирующих ленточно-струнных сит (РЛСС) различной крупности, которые могут выполнять как классифицирующую функцию, так и поддерживающую при использовании металлических, тканых или полиамидных сеток мелкой и тонкой крупности разделения. Кроме этого при совпадении собственных частот колебаний РЛСС и вибропривода амплитуда колебаний резиновых струн возрастает в 2-3 раза по сравнению с амплитудой короба грохота без дополнительного подведения мощности. Суммарная площадь просеивающей поверхности составляет 3,2 м², при габаритных размерах машины 1,4*1,4*1,9 м и массе 1,3 т, что на несколько раз меньше, чем у аналогичных по площади рабочего органа грохотов. Главной особенностью ВВГ является реализуемый, диагонально расположенными по бокам вибровозбудителями, полигармонический режим колебаний рабочей поверхности, при котором достигается пространственно-стохастическое вращение частиц материала относительно ячейки сита. Дополнительная пространственная составляющая колебаний на первых 1,6 м длины просеивающей поверхности способствует наилучшему распределению материала по ширине сита. Это особенно важно при неравномерной подаче материала на рабочую поверхность и при неравномерном по ширине сита питании.

Підготовчі процеси збагачення

При создании грохота, чтобы обеспечить заданные эффективность разделения конкретного сырья и производительность, необходимо знать, как они зависят от режимных и конструктивных параметров грохота и характеристик перерабатываемого материала. Для этого в работе [2] были определены основные факторы, оказывающие существенное влияние на технологические показатели машины – производительность по исходному питанию (Q , т/ч) и эффективность классификации (E , %), которые выбраны в качестве функции цели. Для снижения материальных затрат и времени при проведении исследований ВВГ в труде [2] составлен план экспериментов.

В работах [3-5] авторами были получены количественные оценки влияния конструктивных и режимных параметров грохота, и свойств горной массы на производительность ВВГ. Базируясь на полученных экспериментальных данных, были установлены обобщенные регрессионные зависимости [6, 7] для каждой группы факторов в отдельности.

Для полноты и высокой достоверности разработки математической модели грохота (для определения рациональных и оптимальных параметров работы машины) потребовалось определение взаимного влияния варьируемых факторов на его производительность [8-10].

Целью данной работы является разработка обобщенной регрессионной зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от основных доминирующих факторов.

В ходе экспериментальных исследований все варьируемые факторы, проявляющих наибольшее влияние на производительность ВВГ, были приняты следующие:

- конструктивные параметры ВВГ: длина просеивающей поверхности L , м (0,8...6,4); угол наклона рам просеивающей поверхности α , град. (4...12); размер ячейки классифицирующего сита d , мм (2; 3; 5); пропускная способность бункера-питателя q , т/ч (0,5...2);
- режимные параметры ВВГ: амплитуда колебаний грохота A , мм (1...4); частота вращения вала вибровозбудителя ω , об/мин (1300...2100); угол установки вибровозбудителей относительно вертикали β , град.(0...90);
- характеристики разделяемого материала: процентное содержание подрешетного класса в исходном продукте γ , % (20...60); плотность горной породы ρ , г/см³ (1,4; 2; 2,6; 4,9); влажность материала W , % (0...15).

После составления базы данных из экспериментальных значений функции отклика (Q , т/ч) при различных комбинациях вышеперечисленных факторов, общий объем статистических данных составил 601 измерение. Для разработки обобщенной регрессионной зависимости производительности грохота от десяти основных влияющих на нее факторов, уравнение представляли в следующей форме:

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

Підготовчі процеси збагачення

где Q – функция отклика; a_0 – свободный член уравнения; $a_i \cdot x_i$, $a_{ii} \cdot x_i^2$ – линейные и квадратичные слагаемые; $a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$ – слагаемые парных произведений факторов; $n = 10$ – число переменных факторов. Первоначально общее количество слагаемых уравнения регрессии составило $m = 66$. Коэффициенты заданной зависимости определялись методом наименьших квадратов средствами прикладного пакета обработки статистических данных SPSS Statistics с применением встроенной функции “Шаговый отбор”, при которой независимые переменные (x_i), которые имеют наибольшие коэффициенты частичной корреляции с зависимой переменной (Q), пошагово включаются в регрессионное уравнение [11]. После каждого цикла оценивалась адекватность полученной модели F (статистика Фишера) и коэффициент детерминации R^2 , который показывает, на сколько процентов изменчивость функции объясняется влиянием учтенных в модели факторов. Переменные факторные признаки, коэффициенты регрессии которых по статистике Стьюдента оказываются незначимыми ($t_{tabl} \geq t_{ai}$), исключаются из регрессионной зависимости без особого влияния на результативный признак Q .

В результате расчета была получена в общем виде следующая обобщенная регрессионная зависимость:

$$\begin{aligned} Q = & a_0 + a_1 \cdot q + a_2 \cdot A + a_3 \cdot \omega + a_4 \cdot L^2 + a_5 \cdot q^2 + a_6 \cdot d^2 + a_7 \cdot A^2 + a_8 \cdot \omega^2 + a_9 \cdot \beta^2 + \\ & + a_{10} \cdot \gamma^2 + a_{11} \cdot \rho^2 + a_{12} \cdot W^2 + a_{13} \cdot L \cdot q + a_{14} \cdot L \cdot A + a_{15} \cdot L \cdot \omega + a_{16} \cdot L \cdot \rho + \\ & + a_{17} \cdot L \cdot W + a_{18} \cdot q \cdot A + a_{19} \cdot q \cdot \omega + a_{20} \cdot q \cdot \rho + a_{21} \cdot q \cdot W + a_{22} \cdot d \cdot \alpha + a_{23} \cdot d \cdot A + \\ & + a_{24} \cdot d \cdot \rho + a_{25} \cdot \alpha \cdot A + a_{26} \cdot \alpha \cdot \gamma + a_{27} \cdot \alpha \cdot \rho + a_{28} \cdot \alpha \cdot W + a_{29} \cdot A \cdot \rho + a_{30} \cdot \omega \cdot \gamma + \\ & + a_{31} \cdot \omega \cdot \rho + a_{32} \cdot \omega \cdot W + a_{33} \cdot \gamma \cdot \rho + a_{34} \cdot \gamma \cdot W + a_{35} \cdot \rho \cdot W \end{aligned}$$

Основные статистические характеристики полученной зависимости следующие: коэффициент детерминации $R^2 = 0,992$; критерий адекватности Фишера $F = 1646,7$. Значения коэффициентов регрессионного уравнения и их надежности (t_{rasch}) представлены в табл. 1 ($m = 35$). Критическое значение статистики Стьюдента $t_{tabl} = 1,96$ при степени свободы $\nu = n - m - 1 = 565$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ [12].

По знаку коэффициента a_i можно определить влияния соответствующего фактора x_i на производительность ВВГ: положительный знак свидетельствует о возрастании функции Q при увеличении фактора x_i , отрицательный – о снижении. При этом абсолютное значение коэффициента a_i показывает, на сколько изменится производительность грохота при изменении соответствующего фактора на единицу.

Підготовчі процеси збагачення

Таблиця 1

Расчетные значения коэффициентов регрессии и их надежности

Коэффициент	Значение	$t_{расч}$	Коэффициент	Значение	$t_{расч}$
a_0	1,74	-	a_{18}	0,1155	12,53
a_1	-0,8325	10,88	a_{19}	0,00052	17,22
a_2	-0,176	4,2	a_{20}	0,041	5,08
a_3	-0,0023	12,89	a_{21}	-0,0027	2,35
a_4	0,0036	4,45	a_{22}	0,221	8,25
a_5	-0,0389	2,77	a_{23}	0,0174	2,54
a_6	-0,011	4,01	a_{24}	0,0116	2,06
a_7	0,021	7,16	a_{25}	0,0103	4,2
a_8	0,000001	18,78	a_{26}	-0,00054	3,32
a_9	-0,00006	50,76	a_{27}	0,0048	2,46
a_{10}	0,000035	2,5	a_{28}	0,0017	5,34
a_{11}	-0,0345	16,702	a_{29}	0,0356	6,83
a_{12}	-0,0019	16,59	a_{30}	-0,000006	5,37
a_{13}	0,0551	5,4	a_{31}	0,0001	6,31
a_{14}	-0,0236	7,37	a_{32}	-0,000025	8,63
a_{15}	-0,0001	9,53	a_{33}	0,0019	3,35
a_{16}	-0,0172	6,24	a_{34}	0,0013	6,67
a_{17}	-0,0019	4,66	a_{35}	-0,0076	5,55

Для сравнения расчетных значений производительности по исходному питанию ВВГ и полученных экспериментальным путем в табл. 2 представлены результаты при различных комбинациях влияющих факторов.

Таблиця 2

Сравнение расчетных и экспериментальных значений производительности ВВГ

L , м	q , т/ч	d , мм	α , град	A , мм	ω , об/мин	β , град	γ , %	ρ , г/см ³	W , %	$Q_{экс}$, т/ч	$Q_{расч}$, т/ч
3,2	0,5	3	8	2	1500	45	38	2,6	15	0,136	0,113
6,4	2	3	8	2	1500	45	38	1,4	0	0,572	0,566
3,2	2	3	8	1	1500	45	38	2	3	0,724	0,707
3,2	2	5	8	2	1500	45	38	2,6	15	0,92	0,905
3,2	2	3	12	2	1500	45	38	2,6	15	1,049	1,016
1,6	2	3	8	2	1500	0	38	2,6	0	1,424	1,422
3,2	2	3	8	4	1500	45	50	2	0	1,588	1,559
1,6	2	3	8	2	1700	45	38	2,6	0	1,604	1,613
3,2	2	3	12	4	1500	45	38	2,6	0	2,151	2,179
0,8	2	3	8	2	2100	45	38	2,6	0	2,6	2,66

Для определения степени влияния каждого из факторов x_i на производительность грохота установим приращение δ расчетной регрессионной зависимости $Q(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ при увеличении фактора x_i на единицу относительно его среднего экспериментального арифметического значения: $\bar{L} = 3,283$; $\bar{q} = 1,875$; $\bar{d} = 3,04$; $\bar{\alpha} = 7,98$; $\bar{A} = 2,11$; $\bar{\omega} = 1553,245$; $\bar{\beta} = 44,85$; $\bar{\gamma} = 38,02$; $\bar{\rho} = 2,477$; $\bar{W} = 2,426$. В табл.3 показаны степени влияния каждого из факторов на производительность ВВГ. Так, например, при увеличении длины просеи-

Підготовчі процеси збагачення

ваючої поверхності на 1 м производительность грохота по исходному питанию снижется на 0,122 т/ч.

Таблиця 3

Приращение функции относительно каждого фактора										
Функция	$Q(\bar{L})$	$Q(\bar{q})$	$Q(\bar{d})$	$Q(\bar{\alpha})$	$Q(\bar{A})$	$Q(\bar{\omega})$	$Q(\bar{\beta})$	$Q(\bar{\gamma})$	$Q(\bar{\rho})$	$Q(\bar{W})$
δ	-0,122	0,308	0,164	0,084	0,297	0,0014	-0,0054	-0,0031	0,174	-0,017

Выводы. В результате нелинейного регрессионного анализа получена обобщенная регрессионная зависимость производительности вертикального вибрационного грохота по исходному питанию с учетом характеристик перерабатываемого материала при варьировании режимными и конструктивными параметрами машины. Расчетная зависимость с высокой точностью и адекватностью описывает данные, полученные экспериментальным путем.

Наибольшее влияние на производительность грохота оказывают амплитуда колебаний, пропускная способность бункера-питателя, плотность материала, длина просеивающей поверхности и размер ее ячейки, что подтверждают экспериментальные и расчетные данные.

Список литературы

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., 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. – 2011. – Вип. 92. – С. 120-125.
3. Надутый В.П., Левченко П.В. Результаты экспериментальных исследований зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от его конструктивных параметров // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Укр. міжвід. наук.-техн. зб. держ. ун-ту "Львівська політехніка". – 2011. – Вип. 45. – С.24-27.
4. Надутый В.П., Левченко П.В., Хмеленко И.П. Влияние режимных параметров на производительность вертикального вибрационного грохота // Научно-технический сборник НТУ "ХПИ". – 2011. – Вып. № 50. – С. 114-120.
5. Надутый В.П., Левченко П.В., Хмеленко И.П. Влияние свойств горной массы на производительность вертикального вибрационного грохота // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – 2011. – Вип. 93. – С. 23-29.
6. Надутый В.П., Левченко П.В., Сухарев В.В. Модельное представление зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от конструктивных параметров // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 46(87). – С. 35-41.
7. Надутый В.П., Левченко П.В., Хмеленко И.П. Построение регрессионной зависимости производительности вертикального вибрационного грохота от свойств перерабатываемого материала // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – 2012. – Вип. 96. – С. 46-53.
8. Надутый В.П., Левченко П.В. Исследование производительности вертикального вибрационного грохота при взаимном влиянии регулируемых факторов // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – ПолтНТУ. – 2012. – Вип. 2(32), т.1. – С. 171-177.
9. Левченко П.В. Производительность вертикального вибрационного грохота как ком-

Збагачення корисних копалин, 2012. – Вип. 51(92)

Підготовчі процеси збагачення

плексный показатель результатов влияния регулируемых факторов в заданных условиях // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІТМ НАН України. – 2012. – Вип. 95. – С. 16-22.

10. Левченко П.В. Количественная оценка взаимного влияния параметров классификации на производительность вертикального вибрационного грохота // Сборник научных трудов НГУ. – 2012. – Вып. 2. – С. 21-27.

11. Бююль А., Цефель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. – СПб.: ООО "ДиасофтЮП", 2005. – 608 с.

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

© Надутый В.П, Левченко П.В., 2012

*Надійшла до редколегії 20.08.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Б.О. Блюссом*