

УДК 622,732:51.001.3

В.П. Надутый

ПОВЫШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СХЕМ ПЕРЕРАБОТКИ ГОРНОЙ МАССЫ НА ОСНОВЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ВИБРОГРОХОТА

Запропоновано використання віброгрохоту в якості регулюючого і керівного ланцюга в технологічних схемах переробки гірничої маси. Регулювання показників виконується зміною його режимних та конструктивних параметрів. Для комп'ютерного аналізу і прогнозу показників розроблена нелінійна модель взаємозв'язку показників грохотіння з регульованими параметрами.

Ранее было показано, что совершенствование процесса классификации на вибрационных грохотах в различных технологических схемах переработки горной массы, в частности, в дробильно-сортировочных комплексах горно-обогачительных комбинатов [1, 2] может быть осуществлено за счет выбора и вариации убавляющих и регулируемых параметров виброгрохота. Виброгрохот имеет наибольшее количество регулируемых параметров в технологических схемах цепи аппаратов по переработке горнорудного, металлургического сырья, угля и строительных материалов. Изменение режимных (частоты и амплитуды колебаний), конструктивных (размер ячейки сита, угла наклона, полезной площади) параметров, удельной нагрузки приводит к значительным изменениям производительности и качества перерабатываемой горной массы, поскольку грохоты находятся в последовательной схеме цепи аппаратов. К самым неожиданным результатам может привести сочетание измененных параметров грохота. Поскольку интуитивный выбор рациональных или оптимальных параметров грохота затруднителен, целесообразно прогноз или выбор требуемых технологических показателей грохочения при изменении регулируемых параметров грохота получать на основе моделирования и компьютерного анализа процесса. С этой целью ранее [3] были разработаны линейные регрессионные математические модели виброгрохотов, дробилок и многостадийного цикла дробления в целом. Математические модели разрабатывались на основе большого объема экспериментального материала, полученного в лабораторных и промышленных условиях [4]. Достоверность моделей и выбор значащих коэффициентов регрессионных зависимостей моделей проверялись известными методами, а точность расчетов сравнивалось с имеющимися экспериментальными данными. Эффективность работы виброгрохота характеризуется тремя технологическими параметрами: эффективностью грохочения E , закрупнением ε_+ и замельченностью ε_- . Основными факторными признаками приняты: X_1 - частота колебаний короба грохота (ω), об/мин; X_2 - длина грохота (ℓ), м; X_3 - угол наклона грохота (α),

град; X_4 – размер ячейки сита грохота (d), мм; X_5 – удельная нагрузка на грохот (q), т/ч·м². При этом диапазон значений факторных признаков принят следующий:

$$X_1 = 750, 800, 850, 900, 950, 1000;$$

$$X_2 = 0,8; 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,8;$$

$$X_3 = 0, 8, 11, 15, 20, 25;$$

$$X_4 = 20, 24, 28, 32, 40, 45;$$

$$X_5 = 15, 25, 35, 40, 50, 60.$$

Таким образом, общее число точек факторного пространства составило $N = \sum X_1 + \sum X_2 + \sum X_3 + \sum X_4 + \sum X_5 = 9072$. Ранее были разработаны линейные математические модели показателей грохочения. С целью повышения точности численных расчетов параметров грохочения при компьютерном анализе работы грохота в настоящей работе использовались нелинейные модели для определения параметров грохочения, производился расчет множественных регрессионных моделей, адекватность которых сравнивалась с линейными моделями для каждого показателя грохочения.

Линейная регрессионная модель для определения эффективности грохочения имеет вид:

$$E = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5.$$

Результаты расчета факторных признаков приведены в таблице 1. Множественный коэффициент корреляции $P = 0,85$, статистика Фишера $F = 63,91$. При уровне значимости 0,05 практическое значение коэффициента корреляции равно 0,18, критическое значение статистики Стьюдента – 1,98, критическое значение статистики Фишера – 2,3. Сопоставление полученных результатов с критическими значениями позволяет утверждать, что с уровнем значимости, не превышающим 0,05 (а фактически со значительно меньшим), линейная регрессионная модель является адекватной объекту, а все факторные признаки – существенны.

Таблица 1 – Результаты расчета факторных признаков линейной модели эффективности грохочения

	E	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Средние значения	76,12	873,4	2,28	13,6	32,04	37,46
Средние квадратические отклонения	8,58	84,07	1,25	8,14	8,37	14,13
Частные коэффициенты корреляции	-	0,36	0,73	-0,49	-0,72	-0,41
Коэффициенты регрессии	77,08	0,0206	0,84	-0,314	-0,565	-0,144
Статистика Стьюдента	16,69	4,23	11,65	-6,23	-11,51	-4,94

Ближайшими аналогами закона распределения для эффективности является парабола, поэтому логично исследование параболической регрессионной модели для определения эффективности в виде уравнения регрессии

$$E = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i X_i + \sum_{i=1}^5 a_{i+5} X_i^2.$$

Результаты расчета приведены в табл. 2. Множественный коэффициент корреляции $P = 0,93$, статистика Фишера $F = 80,9$. Из приведенных данных видно, что уровень адекватности параболической модели значительно выше, чем линейной. Кроме этого, значительно сильнее теснота множественной корреляционной связи. Так, если коэффициент детерминации для линейной модели равен $0,72$, то для параболической он равен $0,86$, а это значит, что, если в линейной модели необъяснимы 28% вариаций результативного признака, то в параболической – только 14% . Вместе с тем, изменялся характер влияния факторных признаков на эффективность грохочения. Теснота корреляционной связи с факторным признаком X_5 (удельная нагрузка) получалась достаточно слабой, а коэффициенты регрессии – ненадежными. Можно предположить, что влияние фактора X_5 берут на себя в модели другие факторы (и их квадраты), поэтому исследования целесообразно продолжить на полной регрессионной модели.

Таблица 2 – Результаты расчета факторных признаков параболической модели эффективности грохочения

	E	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_4^2	X_5^2
Средние значения	76,12	873,4	2,28	13,6	32,04	34,76	769960	6,77	250,76	1096,6	1602,9
Средние квадратические значения	8,58	84,07	1,25	8,14	8,37	14,13	147201	7,21	215	554,6	1070
Частные коэффициенты корреляции	-	0,55	0,74	-0,21	0,11	-0,033	-0,54	-0,615	-0,061	-0,27	-0,07
Статистика Стьюдента	5,42	7,14	11,93	2,29	1,24	0,36	6,91	8,43	0,66	3,02	0,8
Коэффициенты регрессии	-197,2	0,59	12,55	-0,276	0,41	-0,039	-0,0003	-1,536	-0,003	-0,015	-0,0012

В этом случае уравнение регрессии будет:

$$E = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i X_i + \sum_{i=1}^5 a_{i+5} X_i^2 + \sum_{i=2}^5 a_{i+9} X_1 X_i + \sum_{i=3}^5 a_{i+12} X_2 X_i + \sum_{i=4}^5 a_{i+14} X_3 X_i + a_{20} X_4 X_5.$$

Средние значения и средние квадратические отклонения те же, что и в предыдущем разделе, поэтому в табл. 3 приведены только корреляционные характеристики. Свободный член уравнения регрессии $a_0 = -145,8$; $t_0 = 4,08$. Множественный коэффициент корреляции $P = 0,95$, статистика Фишера $F = 51,3$. Увеличение числа факторных признаков, естественно, увеличило коэффициент детерминации до $0,9$ против $0,86$ в предыдущей модели. Однако адекватность модели снизилась за счет введения в модель несущественных сочетаний факторных признаков. Поэтому имеет смысл отфильтровать несущественные факторные признаки, ориентируясь на сопоставление частных коэф-

коэффициентов корреляции и коэффициентов надежности Стьюдента с их критическими значениями.

Таблица 3 – Результаты расчета корреляционных характеристик полной модели эффективности грохочения

Параметры	Корреляционные характеристики		
	Частные коэффициенты корреляции	Коэффициенты регрессии	Статистика Стьюдента
X_1	0,550	0,5290	6,80
X_2	0,506	14,8100	6,70
X_3	-0,370	-1,4700	4,11
X_4	-0,120	-0,5300	1,23
X_5	-0,080	-0,1900	0,84
X_1^2	-0,580	-0,0003	7,34
X_2^2	-0,640	-1,4000	8,7
X_3^2	-0,050	-0,0020	0,52
X_4^2	-0,310	-0,0160	3,38
X_5^2	-0,030	-0,0005	0,36
X_1X_2	-0,050	-0,0014	0,54
X_1X_3	0,360	0,0015	4,02
X_1X_4	0,250	0,0010	2,71
X_1X_5	0,070	0,0002	0,73
X_2X_3	-0,084	-0,0240	0,87
X_2X_4	0,069	0,0190	0,71
X_2X_5	-0,240	-0,0420	2,55
X_3X_4	-0,028	-0,0010	0,29
X_3X_5	0,013	0,0003	0,14
X_4X_5	0,074	0,0017	0,14

В соответствии с представленными в табл. 4 расчетными данными для полной регрессионной модели по критериям надежности коэффициентов регрессии и значимости частных коэффициентов корреляции были отобраны следующие факторы:

$$X_1, X_2, X_3, X_4, X_1^2, X_2^2, X_4^2, X_1 \cdot X_3, X_1 \cdot X_4, X_2 \cdot X_5.$$

Выделенные десять факторов отражают влияние всех исходных переменных, причем, переменная X_5 (удельная нагрузка) в модели учитывается только совместно с переменной X_2 (длина грохота). С учетом наиболее существенных факторов полная регрессионная модель для определения эффективности грохочения будет иметь вид:

$$E = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_1^2 + a_6X_2^2 + a_7X_4^2 + a_8X_1X_3 + a_9X_1X_4 + a_{10}X_2X_5.$$

Корреляционные характеристики этой модели приведены в табл. 4. Свободный член уравнения регрессии $a_0 = -150,2$; $t_0 = 4,56$; множественный коэффициент корреляции $R = 0,95$; статистика Фишера $F = 108,7$. Если сопоставить эту ре-

грессионную модель с полной регрессионной моделью, то нетрудно заметить, что уровень детерминации практически не изменился. Это значит, что исключенные сочетания факторных признаков на вариацию результативного признака не оказывают никакого влияния. В то же время существенно возросла оценка адекватности модели – с $F = 51,3$ до $F = 108,7$, следовательно, удаленные из модели факторы можно интерпретировать как помехи, что также подтверждает правильность решения.

Таблица 4 – Корреляционные характеристики факторных признаков регрессионной модели эффективности грохочения

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1^2	X_2^2	X_4^2	X_1X_3	X_1X_4	X_2X_5
Частные коэффициенты корреляции	0,56	0,804	-0,54	-0,11	-0,58	-0,65	-0,330	0,35	0,28	-0,550
Коэффициенты регрессии	0,53	14,1	-1,54	-0,48	-0,0003	-1,47	-0,016	0,0014	0,0011	-0,053
Статистика Стьюдента	7,26	14,630	5,13	1,17	7,79	9,15	3,8	4,0400	3,100	7,18

Полученная модель значительно надежнее и адекватнее по сравнению с линейной и параболической. Таким образом, для определения эффективности грохочения окончательно принимается следующая регрессионная модель:

$$E = -150,22 + 0,5305X_1 + 14,105X_2 - 1,543X_3 - 0,4787X_4 - 0,0003X_1^2 - 1,469X_2^2 - 0,016X_4^2 + 0,0014X_1X_3 + 0,0011X_1X_4 - 0,0525X_2X_5.$$

Следующим определяемым параметром грохочения является закругнение подрешетного продукта ε_+ . Линейную регрессионную модель запишем в виде:

$$\varepsilon_+ = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5.$$

Результаты расчета параметров регрессии приведены в табл. 5. Множественный коэффициент корреляции $R = 0,932$, статистика Фишера $F = 161,9$. Все коэффициенты корреляции принимают значения больше критических, коэффициенты надежности Стьюдента также больше критического значения $t = 1,98$. Следовательно, линейная модель имеет все значимые слагаемые, ее адекватность по Фишеру также достаточно высока. Коэффициент множественной детерминации составляет 0,87. Таким образом, неучтенными остаются 13 % вариаций результативного признака.

Анализируем параболическую регрессионную модель:

$$\varepsilon_+ = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i X_i + \dots + \sum_{i=1}^5 a_{i+5} X_i^2.$$

В результате расчетов получено $R = 0,935$, $F = 80,5$. Из сравнения с линейной моделью видно, что множественный коэффициент корреляции практически не изменился, а показатель адекватности модели F существенно снизился.

Таблица 5 – Факторные признаки линейной модели закругнения продуктов грохочения

		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Средние значения	6,31	873,4	2,28	13,6	32,04	37,46
Средние квадратические отклонения	6,81	84,07	1,25	8,14	8,37	14,13
Частные коэффициенты корреляции	-	-0,28	0,39	-0,19	0,927	0,256
Коэффициенты регрессии	-12,5	0,0086	0,836	-0,059	0,732	0,0456
Статистика Стьюдента	4,95	3,23	4,04	2,13	27,3	2,93

Для анализа полной регрессионной модели запишем ее в виде:

$$\varepsilon_+ = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i X_i + \sum_{i=1}^5 a_{i+5} X_i^2 + \sum_{i=2}^5 a_{i+9} X_1 X_i + \sum_{i=3}^5 a_{i+12} X_2 X_i + \sum_{i=4}^5 a_{i+14} X_3 X_i + a_{20} X_4 X_5.$$

Расчетные значения множественного коэффициента корреляции $R = 0,979$, статистика Фишера $F = 123,5$. Адекватность модели несколько выше, чем в случае параболической модели, множественная корреляция также больше. Однако в модели существенными являются не все факторы, а только часть. В модель включены одиннадцать факторов, которые являются значимыми в полной регрессионной модели:

$$X_1, X_4, X_5, X_1^2, X_2^2, X_4^2, X_1 \cdot X_4, X_2 \cdot X_4, X_2 \cdot X_5, X_4 \cdot X_5.$$

Коэффициент множественной корреляции $R = 0,978$, статистика Фишера $F = 232,9$. По критерию адекватности эта модель является наилучшей. Окончательно она имеет вид:

$$\varepsilon_+ = 64,86 - 0,13X_1 - 0,66X_4 - 0,075X_5 + 0,0001X_1^2 - 0,257X_2^2 - 0,0016X_3^2 + 0,0277X_4^2 - 0,0008X_1X_4 + 0,0587X_2X_4 + 0,0102X_2X_5 + 0,0024X_4X_5.$$

Для анализа третьего параметра грохочения (замельченности ε_-) запишем его линейную регрессионную модель

$$\varepsilon_- = 25,86 - 0,0021X_1 - 3,89X_2 + 0,432X_3 - 0,382X_4 + 0,139X_5.$$

Множественный коэффициент корреляции $R = 0,878$, статистика Фишера $F = 82,02$. Все факторы являются значимыми. Для сравнения рассчитаны показатели параболической регрессионной модели замельченности. Получено: коэффициент множественной корреляции $R = 0,94$; статистика Фишера $F = 88,14$. В этой модели адекватность несколько выше, чем в линейной, однако фактор X_1 (частота колебаний) является незначимым. Для полной регрессионной модели коэффициент множественной корреляции $R = 0,953$, статистика Фишера $F = 53,1$. Адекватность модели существенно снизилась, поэтому полную регрессию использовать нецелесообразно. Регрессионная же модель для отобранных факторных признаков имеет следующие расчетные параметры: коэффициент множественной корреляции $R = 0,83$, статистика Фишера $F = 32,8$. Адекватность модели ниже, чем в предыдущем случае. Таким образом, для замельчен-

ности грохочения следует принять линейную модель, указанную выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надутый В.П. Разработка математической модели вибрационного грохота // Геотехническая механика. -Днепропетровск. -1998. -Вып. № 4. -С. 109-114.
2. Потураев В.Н., Надутый В.П., Эрперт А.М. Разработка математической модели дробильно-сортировочных комплексов для компьютерного анализа их работы // Геотехническая механика. Институт геотехнической механики НАН Украины. -Днепропетровск. -1998. -Вып. № 6. -С. 14-24.
3. Надутый В.П., Эрперт А.М. Разработка модельных представлений дробилок и вибрационных грохотов, работающих в едином технологическом цикле // Вибрация в технике и технологиях. – Винница. –1998. –Вып. 4(8). –С. 52-53.
4. Надутый В.П. Исследование влияния режимных и конструктивных параметров на технологические показатели виброгрохотов с резиновыми ленточно-струнными ситами // Труды II Международного симпозиума по механике эластомеров, июнь 1997 г. Днепропетровск. –1997. –Т. 1. –С. 314-324.

УДК 622.693.23

В.А. Ленда

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРООБРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В БУНКЕРАХ

Розглянуто питання підвищення ефективності вібропорушення матеріалів у бункерах за рахунок використання комбінованого режиму, що складається з низькочастотного та високочастотного навантаження

Вибрационные способы обрушения сыпучих материалов в бункерах имеют широкое применение в технологических схемах добычи и переработки минерального сырья. Особое значение они приобретают при работе с липкими и слеживающимися материалами, особенно в условиях отрицательных температур. При уплотнении и смерзании складированных материалов резко снижается эффективность технологических операций по обеспечению равномерной подачи сырья, что приводит не только к ухудшению качества производимой продукции в технологиях, где особенно важно равномерное дозирование компонентов, но и срыву всего технологического процесса.

В настоящее время рассмотрено и используется большое количество конструктивных и технологических схем применения вибрационных систем для управления процессами обрушения и дозирования материала в технологических бункерах [1]. В связи с этим основным направлением повышения эффективности вибрационного воздействия является оптимизация параметров динамического нагружения материала в бункере. При этом в настоящее время в этой области существуют две основные тенденции, связанные с использованием высокочастотных нагружений, генерируемых ударным воздействием, и низкочастотное моногармоническое нагружение, реализуемое дебалансными мотор-вибраторами.

Техническое осуществление первого направления проводится с использованием электромагнитных или индуктивных ударных систем [2], осуществ-