

Д-р техн. наук В.П. Надутый,
канд. техн. наук А.М. Эрперт,
вед. инж. В.Ф. Ягнюков
(ИГТМ НАН Украины)

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ВАЛКОВОГО ВИБРАЦИОННОГО КЛАССИФИКАТОРА С УЧЕТОМ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

На основі виконаних раніше експериментальних досліджень залежності питомої продуктивності від режимних, конструктивних параметрів та властивостей гірської маси розроблено узагальнену математичну модель роботи грохота.

THE GENERATION MODEL OF WORK OF VIBRATING ROLLER SCREEN IN VIEW OF REGIME AND DESIGN DATA

On the basis of executed before experimental researches of dependence of specific productivity from regime and design data and properties of mountain weight, the generalised mathematical model of work of vibrating roller screen is developed.

Валковые классификаторы привлекают специалистов своей низкой энергоемкостью и металлоемкостью, высокой удельной производительностью, простотой конструкции и обслуживания. Анализ состояния разработки и использования классификаторов показал, что они широко используются в зарубежной практике при добыче и переработке полезных ископаемых, серийно выпускаются десятками машиностроительных фирм многих промышленно развитых государств. В то же время в Украине этот класс машин незаслуженно забыт и в настоящее время не имеет широкого распространения. Возможно, это связано с тем, что применяемые в массовом масштабе вибрационные грохоты удовлетворяли требованиям производств с различными технологиями переработки сырья. Однако в настоящее время, когда начато внедрение новых технологий, усилились требования к повышению удельной производительности, снижению энерго- и металлоемкости, возникла необходимость в поиске новых технических решений в области классификации минерального сырья. Использование валковых классификаторов является одним из перспективных направлений в решении перечисленных задач [1]. При этом следует отметить, что состоянию изученности влияния различных факторов на работу этих классификаторов, разработке методов расчета их параметров уделено недостаточное внимание, что затрудняет выбор их рациональных и оптимальных величин и проектирование по заданным техническим требованиям.

С участием авторов был выполнен комплекс экспериментальных исследований по определению зависимости удельной производительности валкового классификатора от его режимных и конструктивных параметров, влажности и плотности горной массы [2, 3]. Идентификация зависимости производительности от каждого параметра в виде модели позволила установить с достаточной достоверностью характер и количественную оценку влияния каждого фактора [4], но для анализа работы классификатора необходима обобщенная модель за-

зависимости его производительности, учитывающая возможность варьирования всеми параметрами и их комбинациями.

Целью исследований, результаты которых представлены в настоящей работе, является получение обобщенной модели зависимости производительности классификатора от семи параметров, характеризующих особенности машины и горной массы. Функцией цели являлась удельная производительность Q ($\text{т/ч}\cdot\text{м}^2$). Варьируемыми параметрами являлись:

- 1) ω - частота вращения валков, об/мин (420...1320);
- 2) θ - влажность сыпучего материала, % (2...15);
- 3) α - угол наклона грохота, град. (1...15);
- 4) δ - зазор между валками, мм (0; 3,5);
- 5) γ - плотность материала, г/см^3 (1,43; 1,76; 2,25);
- 6) D - диаметр валка, мм (60; 70; 80);
- 7) Δ - эксцентриситет валка, мм (1,0; 3,5; 5,0).

Общий вид искомой зависимости:

$$Q = f(\omega, \theta, \alpha, \delta, \gamma, D, \Delta),$$

в которой все перечисленные параметры классификатора являются варьруемыми. Для получения этой зависимости использовались ранее полученные экспериментальные данные [2, 3], на основании которых был составлен массив статистических данных объемом $n = 320$, что обеспечивает высокую представительность и получение достоверных результатов.

Аппроксимация экспериментальной зависимости производилась методом наименьших квадратов. Критерий этого метода задается в виде [5]

$$F = \sum_{i=1}^n [Q_i - f(\omega_i, \theta_i, \alpha_i, \delta_i, \gamma_i, D_i, \Delta_i)]^2 \rightarrow \min.$$

Минимизируя этот критерий, находим систему уравнений, из решения которой определяются коэффициенты регрессионной зависимости. Полнота описания результативного признака Q факторными признаками ω, \dots, Δ оценивается с помощью коэффициента детерминации R^2 [5], где $0 \leq R^2 \leq 1$. Чем ближе R^2 к единице, тем полнее в полученной модели учтено влияние выбранных факторных варьированных параметров на результативный признак.

Адекватность полученной модели оценивалась с помощью критерия Фишера F [5]. Расчетное значение F сравнивалось с критическим значением $F_{кр}$, которое определялось из распределения Фишера при заданном уровне значимости (в данном случае он равен 0,05). При условии $F \geq F_{кр}$ модель адекватно описывает исследуемый объект, и с увеличением значения F повышается уровень адекватности модели.

Значимость влияния каждого отдельного факторного признака x_j на результативный признак оценивается с помощью коэффициента надежности t_{bj} и ве-

личины коэффициента регрессии b_j при этом признаке [5]. Вычисленные значения коэффициентов надежности сравнивались с критическими значениями $t_{кр}$, которые определялись из распределения Стьюдента при заданном уровне значимости. При этом учитывалось, что если $t_{bj} \geq t_{кр}$, то соответствующий коэффициент модели b_j является значимым (не равным нулю), и факторный признак x_j значимо оказывает влияние на результативный. Если же $t_{bj} < t_{кр}$, то соответствующий факторный признак x_j без ущерба для полноты описания зависимости исключался из модели.

При построении экспериментальной зависимости применялся алгоритм поэтапного исключения незначимых факторов. Вначале выполнялся расчет модели, в которую включены все режимные и конструктивные параметры грохота, их квадраты и произведения. Оценивается адекватность полученной модели и значимость каждого ее слагаемого. Те слагаемые, которые по критерию Стьюдента являются незначимыми, из модели исключаются, и производится повторный расчет зависимости для оставшихся факторов. Эта процедура повторялась до тех пор, пока не подтвердилась значимость всех оставшихся в модели факторов. При этом коэффициент детерминации уменьшается несущественно, а критерий адекватности заметно возрастает. Числовые характеристики экспериментальных статистических данных приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Числовые характеристики изучаемых показателей

Показатели статистики	Значения показателей по факторам							
	ω	θ	α	δ	γ	Δ	Δ	Q
Среднее значение	822,2	9,2	8,3	2,98	1,735	79,7	3,25	15,1
Дисперсия	96781	25,2	26,8	0,194	0,112	5,54	0,87	75,0
Среднее квадратическое отклонение	311,1	5,02	5,18	0,44	0,334	2,35	0,934	8,66

По статистическим данным первоначально была получена обобщенная регрессионная модель, в которой были представлены все линейные члены, их квадраты и их первые произведения. Общее количество слагаемых $m = 35$. Эта модель имела удовлетворительное значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,776$ и удовлетворительный уровень адекватности $F = 50,3$. Однако при критических значениях коэффициента надежности $t_{кр} = 1,97$ большинство слагаемых оказались незначимыми.

Следующим этапом были выделены 12 значимых слагаемых, для которых расчет был произведен повторно. При этом коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,765$, т.е. уменьшился несущественно, а критерий адекватности $F = 83,49$ существенно вырос. В этом случае все включенные в модель слагаемые были значимыми, и регрессионная модель работы классификатора в общем виде может быть записана:

$$Q = \alpha + b_1\omega + b_2\theta + b_3\delta + b_4\gamma + b_5\Delta + b_6\alpha^2 + b_7\gamma^2 + b_8\Delta^2 + b_9\delta + b_{10}\omega\gamma + b_{11}\omega\Delta + b_{12}\theta.$$

При этом определены коэффициенты надежности:

$$t_{\omega} = 8,21; \quad t_{\theta} = 3,33; \quad t_{\delta} = 5,88; \quad t_{\gamma} = 11,99; \quad t_{D} = 9,71;$$

$$t_{\alpha}^2 = 3,127; \quad t_{\gamma}^2 = 12,1; \quad t_{\Delta}^2 = 6,53; \quad t_{\alpha\delta} = 6,59;$$

$$t_{\omega\gamma} = 3,71; \quad t_{\omega\Delta} = 6,5; \quad t_{\omega\theta} = 3,11.$$

Из сравнения коэффициентов надежности параметров полученной модели с критическим значением $t_{кр} = 1,97$ видно, что все слагаемые регрессионной зависимости являются значимыми.

После вычисления значений коэффициентов регрессии модель имеет вид:

$$Q = -50,09 + 0,0554\omega - 0,461\theta + 3,73\delta + 158,13\gamma - 1,184D + 0,0306\alpha^2 - \\ - 43,12\gamma^2 + 1,24\Delta^2 - 0,394\alpha\delta - 0,0095\omega\gamma - 0,0084\omega\Delta - 0,00049\omega\theta.$$

Из полученной обобщенной модели следует, что от параметров α , ω , θ , δ , и D имеет место линейная зависимость, от параметров α и Δ - квадратичная, от параметра γ - параболическая. Кроме этого, наблюдается взаимодействие параметра ω с параметрами γ , θ и Δ , а также параметров α и δ .

Выполненные исследования позволяют проанализировать характер влияния режимных и конструктивных параметров грохота на его удельную производительность. Для этого введем в рассмотрение показатель $GQ(x_j)$ - градиент производительности грохота от параметра x_j :

$$GQ(x_j) = \frac{\partial Q}{\partial x_j}; \quad o=1, 2, \dots, 7.$$

Учитывая, что в формуле градиента производительности присутствуют не только коэффициенты, но и параметры грохота (поскольку модель нелинейная), расчет выполнен при их средних значениях. Результаты расчета градиентов производительности приведены в табл. 2. Абсолютное значение градиента производительности показывает, на сколько единиц изменится удельная производительность грохота при изменении параметра грохота на единицу. Так, например, если угол наклона грохота увеличится на один градус относительно среднего значения, то его удельная производительность снизится на $0,667 \text{ т/ч}\cdot\text{м}^2$; при увеличении зазора между валками на 1 мм удельная производительность возрастает на $0,461 \text{ т/ч}\cdot\text{м}^2$.

Таким образом, установлено следующее влияние параметров грохота на его удельную производительность: 1) при увеличении частоты вращения валков, зазора между валками, плотности материала и эксцентриситета валков удельная производительность увеличивается; 2) при увеличении влажности сыпучего материала, угла наклона грохота и диаметра валков D удельная производительность уменьшается.

Помимо рассмотренной обобщенной регрессионной зависимости исследовались также частотные зависимости удельной производительности класси-

катора от каждого из параметров при фиксированных значениях других параметров. На этих моделях также был подтвержден характер взаимосвязи между параметрами, наглядно показанный с помощью градиентов производительности.

Таблица 2 – Градиенты производительности грохота по каждому варьируемому параметру

Градиент производительности	Расчетная формула	Значение
GQ(ω)	$0,0554-0,0095 \bar{\gamma}-0,00084 \bar{\Delta}-0,00049 \bar{\theta}$	0,00707
GQ(θ)	$-0,461-0,00049 \bar{\omega}$	-0,864
GQ(α)	$0,0612 \bar{\alpha}-0,394 \bar{\delta}$	-0,667
GQ(δ)	$3,73-0,394 \bar{\alpha}$	0,461
GQ(γ)	$158,13-86,24 \bar{\gamma}-0,0095 \bar{\omega}$	0,663
GQ(Δ)	-1,184	-1,184
GQ($\Delta\omega$)	$2,48 \bar{\Delta}-0,0084 \bar{\omega}$	1,161

При решении задачи оптимизации режимных и конструктивных параметров классификатора полученную регрессионную модель рекомендуется использовать оптимизируемой функцией. При этом градиенты производительности указывают, какое значение (максимальное или минимальное) необходимо принять для каждого параметра в области допустимых решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надутый В.П., Ягнюков В.Ф. Высокопроизводительное средство классификации минерального сырья / Тез. докл. IV междунар. конф. "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала". 2-7 февраля 2004. Киев-Славское. Украинский информационный центр. – 2004. – С. 41-43.
2. Надутый В.П., Ягнюков В.Ф., Прокопишин Л.Н. Определение конструктивных параметров вибрационного валкового классификатора на технологические показатели / Матер. Междунар. XI науч.-техн. конф. "Теория и практика процессов дробления, разделения, смешения и уплотнения материалов. Одесса-Харьков. 2002.
3. Надутый В.П., Ягнюков В.Ф., Прокопишин Л.Н. Зависимость производительности валкового классификатора от динамических параметров и свойств горной массы / Всеукр. науч.-техн. журнал "Вібрації в техніці та технологіях". – Винница. – Вып. 1(33). – 2004. – С. 10-14.
4. Надутый В.П., Ягнюков В.Ф. Моделирование влияния параметров валкового вибрационного классификатора на производительность / Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Ин-т геотехнической механики НАН Украины. – Днепропетровск-Симферополь. – 2002. – Вып. 30. – С. 165-171.
5. Кухарев В.Н., Салли В.И., Эрперт А.М. Экономико-математические методы и модели в планировании и управлении / Киев: Вища школа, 1991. – 240 с.