

Д.Г. Холодняков, К.Р. Аргимбаев, Ву Дык Туан, К.А. Старцева
ПОТЕРИ И ЗАСОРЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО
ПРИ ДОБЫЧЕ ЕГО ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

Предложен метод оценки зоны оптимальных значений при нормировании уровня потерь и засорения полезного ископаемого при добыче его открытым способом. Оптимизацию показателей полноты и качества извлечения запасов при добыче, характеризующихся целевыми функциями, целесообразно решать, сведя их в одну. При этом рационально использовать метод так называемой обобщенной функции желательности, минимальное значение которой определяют контрольные цифры годового плана горных работ.

Ключевые слова: потери и засорение полезного ископаемого, функция желательности, оптимизация процессов, экономическая эффективность.

К показателям полноты и качества извлечения запасов при добыче относятся коэффициенты: потеря (η) и засорения (ρ), извлечения полезного компонента ($K_{и}$), изменения качества ($K_{к}$) руды при добыче [1].

$$\eta = \frac{P}{B}, \quad \rho = \frac{V}{D}, \quad K_{и} = \frac{D \cdot a}{B \cdot c}, \quad K_{к} = \frac{a}{c} \quad (1)$$

Все указанные коэффициенты связаны между собой и выводятся из известных уравнений баланса руды и металла:

$$D = B - P + V, \\ Da = B \cdot c - P \cdot c_{п} + V \cdot v, \quad (2)$$

где D , B – соответственно, добытая руда и погашенные балансовые запасы, т; a , c , $c_{п}$, v – соответственно, содержание контролируемого показателя в добытой руде, погашенных балансовых запасах, теряемой руде, засоряющих породах, %; P , V – соответственно, потери руды и засоряющая порода, т

В задачу нормирования показателей извлечения руды при добыче входит обоснование и установление контрольных значений, при которых горное предприятие достигает наилучших технико-экономических пока-

зателей. Существуют несколько расчетных схем решения этой задачи в зависимости от формализации целевой функции оптимизации [1]. При этом расчетный алгоритм рассматривается как многоструктурная целевая функция, которая аналитически описывает формирование качественных характеристик минерального сырья и затрат по всему технологическому циклу добычи и переработки [2].

Расчет такой целевой функции представляется достаточно сложным и громоздким. В настоящей работе предложен упрощенный метод оценки зоны оптимальных решений при нормировании уровня потерь и засорения руды при добыче ее открытым способом.

Оптимизация показателей полноты и качества извлечения запасов при добыче рассматривается как составной элемент оптимизационной модели технологии рудоподготовки на горном предприятии, который характеризуется несколькими целевыми функциями.

Причем, иногда одна из них может оказаться несовместимой с другой. Например, при увеличении выхода добытой руды из карьера ее качество снижается. Поэтому рассмотрение мак-

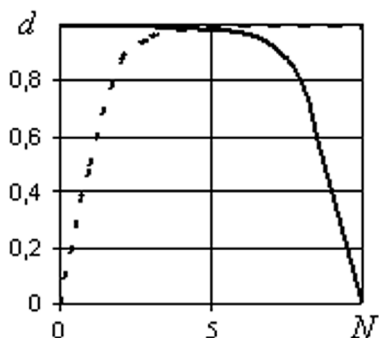


График частных функций желательности: d – значение функции, доли ед.; N – номер варианта

симизации добычи руды и металла без максимизации содержания полезного компонента в ней некорректно.

Задачу оптимизации процессов, характеризующихся несколькими целевыми функциями, целесообразно решать, сведя эти функции в одну. При этом наиболее рационально использовать метод так называемой обобщенной функции желательности, успешно примененный при оптимизации процесса обогащения полезных ископаемых [2, 3].

Алгоритм построения функции желательности заключается в следующем. Сначала целевые функции преобразовываем в частные функции желательности d . Значение $d = 0$ соответствует абсолютно неприемлемому значению данной целевой функции. Значение $d = 1$ – самому лучшему значению целевой функции, при этом дальнейшее улучшение ее или невозможно или нецелесообразно (рисунок). Промежуточные значения функций желательности разбиваются на пять интервалов: 0–0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,6; 0,6–0,8; 0,8–1,0 по степени улучшения соответствия значениям функции цели. Подобное деление используется и для обобщенной функции желательности.

Для односторонних ограничений вида $x \leq x_{\max}$ или $x \geq x_{\min}$ используется экспоненциальная зависимость

$$d = \exp [-\exp (-f)] , \quad (3)$$

где $f = A + B \cdot x$.

Коэффициенты A и B определяют, задавшись интервалом изменения f .

Обобщенная функция желательности представляет собой

$$D = \sqrt{d_1 \cdot d_2 \dots \cdot d_n} = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{1/2} , \quad (4)$$

где d_i – частные функции желательности.

Если какая-либо частная функция желательности равна нулю, то обобщенная функция также равна нулю. С другой стороны, $D = 1$, если все $d_i = 1$. Очевидно, что $D \leq 1$.

Функция D имеет оптимум, если выполняется условие

$$\sum_{i=1}^n f'(x_i) \exp [-f(x_i)] = 0 , \quad (5)$$

где $f(x_i)$ – производная от функции $f(x_i)$ по x ; $-$ параметр оптимизации.

Для решения задачи по оптимизации показателей полноты и качества извлечения запасов руды в карьере функция каждого параметра оптимизации $f(x_i)$ будет иметь вид:

$$f(x_i) = A_i + B_i$$

Для всех параметров оптимизации берем пределы изменения $f(x_i)$ от -2 до $+5$.

Тогда $f(x_i)$ находится из условий:

$$\left. \begin{aligned} x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ -2 \leq f \leq 5 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

При этом необходимо иметь в виду то обстоятельство, что $f = 5$ должно ставиться в соответствие с наилучшим значением параметра x : если x означает качество, то $f = 5$ при $x = x_{\max}$; если x параметр браковочный, то $f = 5$ при $x = x_{\min}$. В первом случае имеем

$$f = \frac{7}{\Delta x} x + \left(5 - \frac{7}{\Delta x} x_{\max} \right) , \quad (7)$$

во втором

$$f = \left(5 + \frac{7}{\Delta x} x_{\min} \right) - \frac{7}{\Delta x} x , \quad (8)$$

В этих формулах $\Delta x = x_{\max} - x_{\min}$.

В условиях поставленной задачи параметрами оптимизации являются величины уравнения баланса (2) и технико-экономических показателей работы обогатительной фабрики

$$a = \frac{c - c_{\Pi}\eta + Br}{1 - \eta + r}, \quad r = \rho \cdot \frac{1 - \eta}{1 - \rho},$$

$$\gamma = \frac{a - \theta}{\beta - \theta}, \quad \varepsilon = \frac{\beta}{a} \gamma, \quad (9)$$

где γ – выход концентрата; ε – извлечение компонента в концентрат; β , θ – соответственно, содержание контролируемого показателя в концентрате и хвостах обогащения.

Таблица 1

Исходные данные к анализу

Показатель	Индекс	Минимальное значение	Максимальное значение
Коэффициент потерь, %	η	1,63	8,25
Коэффициент засорения, %	ρ	1,36	6,08
Содержание железа в добытой руде, %	a	38,04	39,6
Выход концентрата, %	γ	56,17	58,99
Затраты на 1 т концентрата, руб	Z_k	196,58	203,39

Таблица 2

Расчетные варианты оптимизации

№	Коэф-ты		Руда D , тыс. т.	Сод-е железа в руде a , %	Выход конц-та γ , %	Затраты на 1 т конц-та Z_k , руб.	Прибыль на 1 т конц-та Pr , руб.
	η , %	ρ , %					
0	1,63	6,08	11 714	38,04	56,17	197,08	52,929
1	1,83	4,50	11 498	38,46	56,93	196,85	52,867
2	1,94	3,44	11 358	38,74	57,44	196,69	52,837
3	2,03	2,67	11 257	38,95	57,81	196,58	52,811
4	2,23	2,09	11 167	39,11	58,11	196,64	52,659
5	2,59	1,67	11 080	39,24	58,34	196,91	52,345
6	3,16	1,44	10 989	39,34	58,51	197,48	51,801
7	3,94	1,36	10 892	39,41	58,64	198,32	51,050
8	4,96	1,41	10 781	39,46	58,74	199,47	50,050
9	6,31	1,53	10 641	39,52	58,84	201,06	48,714
10	8,25	1,73	10 441	39,60	58,99	203,39	46,805

В качестве примера рассмотрим исходные условия одного из железорудных карьеров (табл. 1).

Согласно предварительным расчетам установлено, что уровень потерь связан обратной зависимостью с засорением руды (табл. 2) и численно изменяется от 1,63 до 8,25%. Естественно, что с увеличением потерь за счет снижения засорения повышается качество руды, подаваемой на обогащение.

Это в свою очередь приводит к повышению выхода концентрата и извлечения металла в концентрат. Одновременно снижаются объемы добычи руды, но увеличивается доля условно-постоянных затрат на 1 т концентрата.

В этих условиях оптимизация величин потерь и засорения руды фактически решает задачу обоснования числовых показателей всего комплекса добычных работ и первичного передела.

Определим, для примера, коэффициенты A и B для преобразования коэффициента потерь (η) в $f(\eta)$. Учитываем, что при η_{\min} достигается лучший результат и $f = 5$, а при η_{\max} $f = -2$.

Тогда:

$$A + 1,63B = 5, \quad A + 8,25B = -2.$$

Отсюда

$$A = 6,72; \quad B = -1,057.$$

Рассчитывая по аналогии и используя формулы (7) и (8) для всех параметров оптимизации в соответствии с табл. 1, будем иметь:

$$f(\eta) = 6,72 - 1,057\eta ;$$

$$f(\rho) = 7,02 - 1,483\rho ;$$

$$f(a) = 4,487a - 172,69 ;$$

$$f(\gamma) = 2,482\gamma - 141,43 ;$$

$$f(z_k) = 207,06 - 10,2793 \cdot z_k. \quad (10)$$

Для каждого из расчетных вариантов (например, соответствующим различным положениям технологической

поверхности участка горного массива в зоне контакта полезного ископаемого с вмещающими породами) для всех параметров оптимизации рассчитываем функции $f(x_i)$ по формулам (10). Расчетные варианты оптимизации представлены в табл. 2. Результаты расчетов функций сведены в левую часть табл. 3.

Частные функции желательности рассчитываются для каждого параметра и варианта расчета по формуле (3). Например, для коэффициента потерь в первом варианте расчета:

$$d_{\eta} = \exp [- \exp (- 4,78)]$$

$$d_{\eta} = 2,718^{-2,718^{-4,78}} = 0,992$$

По аналогии рассчитываются все частные функции желательности. Их значения для условий карьера (табл. 1) представлены в табл. 3. Здесь же для каждого расчетного варианта указаны обобщенные функции желательности, определенные по формуле (4).

Наилучший результат, при котором обобщенная функция желательности максимальна ($D = 0,949$), получен для 6-го варианта.

Таким образом, годовой план горных работ в качестве контрольных цифр

Таблица 3

Расчет обобщенной функции желательности

№	f_{η}	f_{ρ}	f_a	f_{γ}	f_{z_k}	$d_{f_{\eta}}$	$d_{f_{\rho}}$	d_{f_a}	$d_{f_{\gamma}}$	$d_{f_{z_k}}$	D
0	4,99	-2,00	-2,00	-2,00	4,48	0,993	0,000	0,000	0,000	0,988	0,000
1	4,78	0,34	-0,12	-0,13	4,71	0,992	0,493	0,324	0,320	0,991	0,224
2	4,67	1,92	1,14	1,14	4,88	0,991	0,863	0,725	0,725	0,992	0,668
3	4,57	3,06	2,08	2,05	5,00	0,990	0,954	0,882	0,880	0,993	0,853
4	4,36	3,92	2,80	2,80	4,93	0,987	0,980	0,941	0,941	0,993	0,922
5	3,98	4,54	3,38	3,37	4,66	0,981	0,989	0,966	0,966	0,990	0,947
6	3,38	4,88	3,83	3,79	4,07	0,966	0,992	0,978	0,978	0,983	0,949
7	2,56	5,00	4,14	4,11	3,21	0,925	0,993	0,984	0,984	0,960	0,924
8	1,48	4,93	4,37	4,36	2,02	0,796	0,993	0,987	0,987	0,876	0,821
9	0,05	4,75	4,63	4,61	0,39	0,386	0,991	0,990	0,990	0,508	0,436
10	-2,00	4,45	5,00	-5,00	-2,00	0,000	0,988	0,993	0,993	0,000	0,000

в соответствии с табл. 2 должен включать следующие значения:

- объем добычи руды (D), тыс. т – 10 989;
- содержание железа в добытой руде (a), % – 39,34;
- выход концентрата (g), % – 58,51;

• коэффициент потерь руды (γ), % – 3,16;

• коэффициент засорения руды (r), % – 1,44.

При этом затраты на 1 т концентрата (Z_k) составят 197,48 руб, а ожидаемая прибыль 51,8 руб/т.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Холодняков Денис Генрихович – кандидат технических наук, докторант,

e-mail: zenitden@mail.ru,

Аргимбаев Каербек Рафкатович – кандидат технических наук, e-mail: diamond-arg@mail.ru,

Бу Дык Туан – аспирант,

Старцева Ксения Александровна – аспирант,

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адигамов Я.М., Мининг С.Э. Нормирование потерь полезных ископаемых при добыче руды. – М.: Недра, 1978.

2. Гальянов А.В., Лаптев Ю.В., Холодняков Д.Г. Оптимизация показателей полноты и качества извлечения запасов при добыче //

Горный журнал. Известия вузов. – 2000. – № 7.

3. Рубинштейн Ю.Б., Волков Л.А. Математические методы в обогащении полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. **ИДБ**

UDC 622.333

LOSSES AND CONTAMINATIONS OF MINERALS AT OPEN-CAST MINING

*Kholodnyakov D.G.*¹, Candidate of Technical Sciences, Doctoral Candidate,

e-mail: zenitden@mail.ru,

*Argimbayev K.R.*¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: diamond-arg@mail.ru,

*Vu Tuan*¹, Graduate Student,

*Startseva K.A.*¹, Graduate Student,

¹ National Mineral Resource University «University of Mines»,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

An assessment method of a zone of optimum values when rationing level of losses and contaminations of minerals at open-cast mining is offered.

Key words: losses and contaminations of minerals, function of desirability, optimization of processes, economic efficiency.

REFERENCES

1. Adigamov Ya.M., Mining S.E. *Normirovanie poter' poleznykh iskopaemykh pri dobyche rudy* (Standardization of mineral loss in ore mining), Moscow, Nedra, 1978.

2. Gal'yanov A.V., Laptev Yu.V., Kholodnyakov D.G. *Gornyi zhurnal. Izvestiya vuzov*. 2000, no 7.

3. Rubinshtein Yu.B., Volkov L.A. *Matematicheskie metody v obogashchenii poleznykh iskopaemykh* (Mathematical methods in mineral processing), Moscow, Nedra, 1987.

