УДК 622.271

В.В. Летучий

К ВОПРОСУ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

Викладено рішення важливої науково-технічної проблеми вибору раціональної конструкції бортів кар’єрів. Проаналізовано існуючи підходи до побудови стійкого контуру борту кар’єру, що забезпечує мінімальний обсяг гірської виробки. Виходячи з представлень геомеханіки відкритих гірничих робіт, сформульована оптимізаційна задача для визначення контуру борту кар'єру і запропоновано її рішення з використанням спеціальної методики.

Изложено решение важной научно-технической проблемы выбора рациональной конструкции бортов карьеров. Проанализированы существующие подходы к построению устойчивого контура борта карьера, обеспечивающего минимальный объем горной выработки. Исходя из представлений геомеханики открытых горных работ, сформулирована оптимизационная задача для определения контура борта карьера и предложено ее решение с использованием специальной методики.

The solution of important scientific and technical problems of rational creation choice of pitedges. Existent solution for the creation of pitedges steady contour. Providing the minimum volume of the quarries is analysed. Proceeding from representations of open mining geomechanics, the optimising problem for definition of a contour of pitedges is formulated and its decision of this problem with use of a special technique is offered.

Открытый способ разработки месторождений, с одной стороны, является основным направлением развития горной промышленности, а с другой – наиболее существенные нарушения природной среды возникают именно при открытых горных работах, для организации которых используется значительная территория, занятая карьерами, отвалами, транспортными коммуникациями, траншеями, остаточными выработанными пространствами и другими инженерными сооружениями.

Так, средняя площадь карьера строительных материалов составляет 30-250 га, железной руды – 150-500 га, карьера по добыче марганцевой руды, редкоземельных металлов или угля – 1000-2000 га [1]. При открытой разработке горизонтальных месторождений с мягкими покрывающими породами вопросы выбора рациональных конструктивных параметров бортов карьера наиболее тесно связаны с условиями устойчивости горного массива. Это обусловлено следующим: низкие показатели прочностных свойств пород (особенно в сложных горно-геологических условиях разработки), большой риск развития оползневых явлений (что подтверждает и статистика), приоритет геомеханических ограничений на параметры откосов перед технологическими.

С точки зрения нанесения экологического ущерба компонентам окружающей среды в рассматриваемом случае происходит наиболее значительное повреждение литосферы, связанное с нарушенностью земель. Изыскание новых рациональных технологических решений и новых подходов к решению проблемы снижения количества изъятия и нарушения земель является актуальным. Одним из таких направлений является поиск оптимальной конструкции бортов карьеров и отвалов.

Цель данной статьи состоит в анализе существующих подходов к проблеме и их дальнейшее развитие.

На основании анализа работ [2, 3], можно заключить, что в общем случае ставилась задача построения контура борта карьера $f(x)$ с минимальным объемом горной выработки (характеризуется площадью S) при условии обеспечения нормативного запаса устойчивости η_H борта карьера и его отдельных структурных элементов (рис. 1). На рис. 1 приняты также следующие обозначения: H – высота борта, $y(x)$ – уравнение потенциальной поверхности (линии скольжения), $h(x)$ – текущее значение высоты призмы обрушения, x_A, x_B – значения расстояний от начала координат O по горизонтали до верхней бровки откоса (точка A) и точки выхода потенциальной поверхности скольжения на дневную поверхность (точка B) соответственно.

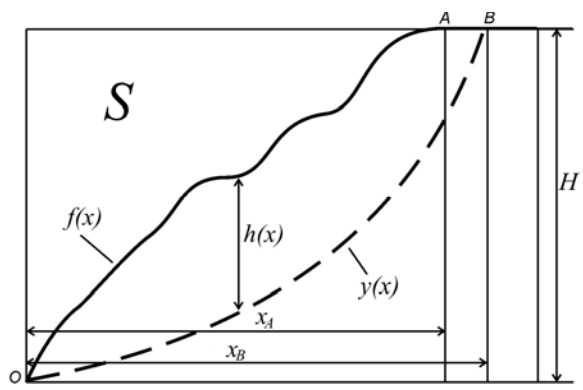

Рис. 1. Схема к расчету устойчивости и определению рационального профиля борта карьера

Для анализа устойчивости борта применялась известная модель Кулона-Мора, согласно которой обрушение может происходить по поверхности с наименьшим коэффициентом запаса устойчивости, который определяется как отношение удерживающих усилий $F_{уд}$ к сдвигающим $F_{сдв}$. Поверхность обрушения предполагается параболической, что неплохо согласуется с известными экспериментальными наблюдениями. В рамках этого подхода постановка оптимизационной задачи, исходя из представлений геомеханики открытых горных выработок, состоит в следующем. Требуется определить контур борта карьера $f(x)$, при условии, что высота H и характерные точки O и A заданы. Вид и свойства функции $y(x)$ в общем случае не известны. Математическая постановка такой задачи имеет вид:

$$S = \int_0^{x_A} \left(H - f(x)\right) dx \to \min \; ; \qquad (1)$$

$$\eta^* = \frac{F_{уд}}{F_{сдв}} \to \min \; ; \qquad (2)$$

$$\eta^* \ge \eta_H \; ; \qquad (3)$$

$$F_{сдв} = \gamma \cdot \operatorname{tg} \rho \int_0^{x_B} h(x) \sin \varphi(x) dx \; ; \qquad (4)$$

$$F_{уд} = \gamma \cdot \operatorname{tg} \rho \int_0^{x_B} h(x) \cos \varphi(x) dx + c \int_0^{x_B} \sqrt{1 + y'^2(x)} dx \; ; \qquad (5)$$

$$h(x) = \begin{cases} f(x) - y(x), x \in [0; x_A] \\ H - y(x), x \in [x_A; x_B]; \end{cases} \qquad (6)$$

$$\varphi(x) = \operatorname{arctg} y'(x) \; ; \qquad (7)$$

$$f(0) = y(0) = 0 \; ; \qquad (8)$$

$$f(x_A) = y(x_B) = H; \qquad (9)$$

$$f(x) \ge y(x) . \qquad (10)$$

Условные обозначения в (1) – (10), которые ранее не расшифрованы, имеют следующий смысл: η^* – текущее значение запаса устойчивости, γ – плотность, ρ – угол внутреннего трения, c – сцепление пород.

Параметр x_B в общем случае не известен. Механические свойства грунта $c; \gamma; \rho$, коэффициент запаса устойчивости η_H и геометрические параметры x_A и H считаются известными (они обычно задаются из конструкционных соображений).

Принципиальные трудности при решении поставленной задачи связаны с необходимостью одновременной минимизации двух взаимосвязанных функций S и η^*, т.к. оптимальная форма борта карьера зависит от положения и формы потенциальной поверхности обрушения, которая, в свою очередь, определяется формой борта карьера. Таким образом, для получения в рамках общей постановки (1)-(9) стандартной задачи оптимизации, должна задаваться либо поверхность обрушения, либо форма борта карьера. Однако, очевидно, что в реальных ситуациях поверхность обрушения не известна наперед, а при задании формы борта карьера рассматриваемая здесь задача оптимизации лишена практического смысла.

Для преодоления вышеизложенных противоречий, предпринимались различные упрощения. С учетом того, что из физических соображений $S > 0$ и $\eta > 0$, в [2] было предложено соотношения (1) и (2) заменить одним условием $S \cdot \eta \to \min$.

Также в [5] предлагалось отказаться от нахождения экстремума (2). В рамках принятых допущений рассматривались так называемые интегральные поверхности обрушения, которые определялись из соотношения:

$$F_{уд} = F_{сдв} .$$

Таким образом, ранее делались различные попытки упростить и привести общую постановку к стандартной задаче математического программирования. В данной статье предлагается вернуться к изначальной постановке (1) – (9) и решить задачу оптимизации с использованием специальной методики.

Как отмечено выше, можно сформулировать две оптимизационные задачи:

1) для заданного контура борта $f(x)$ карьера требуется найти коэффициент запаса устойчивости (2) и линию обрушения $y(x)$ из заданного класса функций;

2) для заданной линии обрушения и заданного предельного коэффициента запаса устойчивости η_H (по рекомендациям [4] обычно принимают η_H = 1,2) требуется отыскать форму борта карьера, которая обеспечивает минимальный объем вскрышной выработки.

Решение первой задачи, как правило, ищут на некотором классе функций (например, полиномы или кусочно-линейные функции). Практика показала [1, 4], что с экспериментальными данными достаточно хорошо согласуются параболические поверхности обрушения. В связи с этим далее будем полагать, что

$$y(x) = A_1 x^2 + B_1 x ,$$

где A_1 и B_1 – неизвестные коэффициенты, определяющие уравнение параболы.

В рамках такого предположения первая задача сводится к отысканию экстремума функции двух переменных с учетом заданных нелинейных ограничений.

Вторая задача ранее рассматривалась в [2]. Учитывая, что условие (1) математически равносильно условию

$$\int_0^{x_A} f(x)\,dx \to \max\,, \tag{11}$$

а соотношения (4), (5) с учетом (6) и (7) можно преобразовать в виде:

$$F_{уд} = \gamma \cdot \operatorname{tg}\rho \left[\int_0^{x_A} \frac{f(x) - y(x)}{\sqrt{1 + y'^2(x)}}dx + \int_{x_A}^{x_B} \frac{H - y(x)}{\sqrt{1 + y'^2(x)}}dx \right] + c\int_0^{x_B} \sqrt{1 + y'^2(x)}dx\,; \tag{12}$$

$$F_{сдв} = \gamma \cdot \operatorname{tg}\rho \left[\int_0^{x_A} \frac{y'(x)\big(f(x) - y(x)\big)}{\sqrt{1 + y'^2(x)}}dx + \int_{x_A}^{x_B} \frac{y'(x)\big(H - y(x)\big)}{\sqrt{1 + y'^2(x)}}dx \right], \tag{13}$$

ограничение (3) запишем в виде:

$$\int_0^{x_A} f(x)g(x)dx \ge \Phi\,, \tag{14}$$

где $g(x)$, Φ – соответственно функция и константа, которые определяются через известные вспомогательные параметры $\Phi_{уд}$ и $\Phi_{сдв}$:

$$g(x) = \frac{\operatorname{tg}\rho - \eta_H y'(x)}{\sqrt{1 + y'^2(x)}}\,,$$
$$\Phi = \eta_H \Phi_{сдв} - \Phi_{уд}\,, \tag{15}$$

$$\Phi_{уд} = -\operatorname{tg}\rho \left[\int_0^{x_A} \frac{y(x)}{\sqrt{1 + y'^2(x)}}dx + \int_{x_A}^{x_B} \frac{H - y(x)}{\sqrt{1 + y'^2(x)}}dx \right] + \frac{c}{\gamma}\int_0^{x_B} \sqrt{1 + y'^2(x)}dx\,;$$
$$\Phi_{сдв} = -\int_0^{x_A} \frac{y(x)y'(x)}{\sqrt{1 + y'^2(x)}}dx - \int_{x_A}^{x_B} \frac{\big(H - y(x)\big)y'(x)}{\sqrt{1 + y'^2(x)}}dx\,. \tag{16}$$

Тогда вторая оптимизационная задача может быть сформулирована следующим образом. Требуется отыскать функцию $f(x)$, которая обеспечивает максимум функционала (11), удовлетворяет нелинейному ограничению (14) и граничным условиям (8) – (10).

Учитывая, что борт реального карьера имеет ступенчатый профиль, оптимальный контур $f(x)$, являющийся решением второй задачи, будем искать на классе кусочно-линейных функций специального вида (рис. 2). На рисунке α_k – угол наклона откоса уступа, b_k – берма, H_k – высота *k*-го уступа, H и x_A – соответственно высота и заложение борта. Параметры H и x_A также однозначно определяют результирующий угол наклона борта и задаются из конструкционных соображений, а на параметры α_k, b_k, H_k, в общем случае, накладываются некоторые ограничения из технологических соображений:

$$\alpha_{\min} \le \alpha_k \le \alpha_{\max}\,;$$

$$b_{\min} \le b_k \le b_{\max}\,;$$

$$H_{\min} \le H_k \le H_{\max}\,.$$

Также должны выполняться следующие очевидные условия:

$$\sum_k H_k = H\,;$$

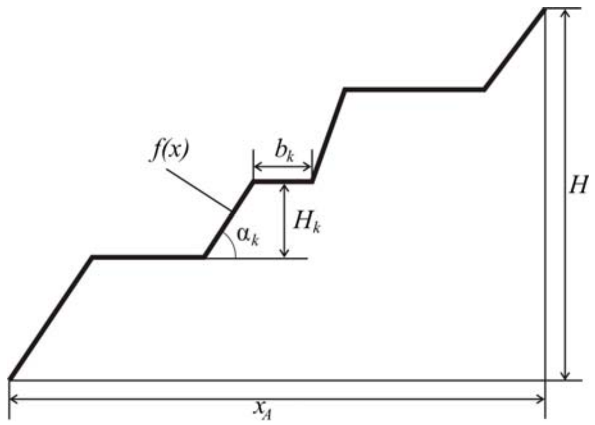

Рис. 2. Схема к оптимизации параметров борта карьера

$$\sum_k \left(b_k + H_k ctg\alpha_k\right) = x_A\,.$$

При постановке подобных задачи оптимизации в таком виде, необходимо гарантировать совместность всех ограничений на параметры, задающие форму борта.

Очень важно заметить, что при рассмотрении ступенчатого профиля борта, необходимо гарантировать устойчивость не только всего борта (условие (14)), но и отдельных его элементов (уступов и групп уступов). Выполнение условий для отдельных элементов борта карьера целесообразно заложить в ограничения на параметры α_k, b_k, H_k. Выбрав конкретное значение коэффициента η_H и решив серию задач типа 1) для различных значений H и x_A, можно получить набор предельных (допустимых) значений высоты борта $H_{\max}$ для различных значений результирующего угла. Интерполируя полученные точки, получаем зависимость $H_{\max}(\alpha)$, которая, в свою очередь, может быть заложена в ограничения на параметры α_k и H_k на ряду с имеющимися конструкционными ограничениями.

Таким образом, нами введены в рассмотрение две вспомогательные задачи. Для решения общей задачи (1)-(9) предлагается применить итерационный метод, основанный на последовательном решении задач 1 и 2. В качестве начального приближения выбирается прямолинейная форма борта карьера:

$$f_0 = \frac{H}{x_A} x .$$

Далее решается задача 1. В результате получим значение коэффициента запаса устойчивости и линию обрушения $y_0(x)$. Эти данные можно применить для решения второй задачи, которая даст первое приближение к оптимальной форме борта карьера $f_1(x)$, и так далее. Таким образом, на каждом шаге выполняются следующие действия:

$$y_k = F_1\{f_{k-1}\},\ f_k = F_2\{y_{k-1}\},$$

где F_1 и F_2 означает решение соответственно первой и второй вспомогательных задач.

Итерационный процесс следует завершить, когда

$$\|f_k - f_{k-1}\| \le \varepsilon ,$$

где $\|\bullet\|$ – некоторая норма (например, интегральная норма L_1) функции одной переменной.

Направление дальнейших исследований будет связано с практической реализацией предложенного теоретического подхода для реальных условий открытой разработки горизонтальных месторождений полезных ископаемых.

Список литературы

1. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов, строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Л.: ВНИМИ, 1972. – 163 с.
2. Прогноз устойчивости и оптимизация параметров бортов глубоких карьеров / Под ред. С.З. Полищука. – Д.: Полиграфист, 2001.
3. Цветков В.К., Демин А.М. Расчет рациональной формы контура борта карьера // Проблемы открытой разработки глубоких карьеров. Тр. Междунар. симпозиума «Мирный-91». – Удачный: НИЦ «Мастер», 1991.
4. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Недра, 1965. – 378 с.
5. Голуб В.В., Полищук С.З. Дифференциальное уравнение линии сдвижения природных и техногенных откосов // Сб. научн. тр./ НГАУ. – Д., 2000. – Т. 2, № 9.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.І. Симоненком 17.02.10