ГОДИШНИК НА МИННО-ГЕОЛОЖКИЯ УНИВЕРСИТЕТ "СВ. ИВАН РИЛСКИ", Том 52, Св. II, Добив и преработка на минерални суровини, 2009
ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF MINING AND GEOLOGY "ST. IVAN RILSKI", Vol. 52, Part II, Mining and Mineral processing, 2009

ОПТИМИЗИРАНЕ УСТОЙЧИВОСТТА НА ОТКОС ПО МЕТОДА НА СЛУЧАЙНОТО ТЪРСЕНЕ

Георги Трапов**, **Паулин Златанов

Минно-геоложки университет "Св.Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. Оценката на устойчивостта на откривно или добивно стъпало в открит рудник е необходимо условие за неговата нормална работа. Стойностите на физичните и якостни показатели на масива са променливи величини във времето и пространството, което не се отчита. Това води до резултати, които често не съответстват на действителността. С помощта на метода на случайното търсене се определя зоната, в която се намира вероятната повърхнина на свличане. Оценява се риска от свличане на откоса при оценка на устойчивостта по традиционния начин.

A SLOPE STABILITY OPTIMIZATION BY METHOD OF CASUAL SEARCH

Georgi Trapov, Paulin Zlatanov
University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. The valuation of working bench slope stability in open-pit is a necessary condition for its normal operation. The values of the massif physics and strength indices are variable quantities which are not accounted. This leads to results that don't correspond to the real situation. Using the method of casual search the area where is situated probable surface landslide is determined. The risk of slope landslide is evaluated by traditional method.

Една от основните задачи при проектиране и експлоатация на открити рудници е осигуряване на устойчивостта на работните, неработните бордове, насипищата и прилежащата инфраструктура. За източномаришките открити рудници това е съществен въпрос, тъй като се работи в слаби скали, на големи площи и със значителни изменения на свойствата във вертикално и латерално отношение, т. е. при сложни инженерногеоложки условия. Картината допълнително се усложнява като се има предвид влиянието на минно-техническите и минно технологичните фактори.

Тук е прието разбирането (Фисенко, 1965; Мельников, 1981; Панюков, 1978; Арсентьев, 1982 и др.) под устойчивост на борда да се счита неговата способност да се противопостави на въздействието на различни външни сили и да запазва функциите си продължително време.

Описаните в Стоева и др., (2005), Христов, (2000) методи за определяне на устойчивостта позволяват да се намери в масива формата и положението на плъзгателната повърхнина, във всяка точка от която е спазено условието за гранично равновесие на Кулон. Ако частта от скалния масив над плъзгателната повърхнина по определен начин е разделен на *n* блока, то в равнинния случай, условието за равновесие се изразява с равенството

$$\sum_{i=1}^{n} P_i \sin\alpha_i = tg\varphi \sum_{i=1}^{n} P_i \cos\alpha_i + \sum_{i=1}^{n} c_i l_i ,$$

където:

P_i $[t]$ е теглото на *i*-ти блок;

α_i [...°] - ъгъл на наклона на линията на плъзгане в основата на *i*-ти блок;

φ [...°] - ъгъл на вътрешно триене на масива;

c_i [t/m^2] – кохезията в масива на *i*-ти блок;

l_i [*m*]– дължината на линията на плъзгане на *i*-ти блок.

Избраният метод трябва да позволява намиране на най-слабата повърхнина на плъзгане при спазване на статичното равновесие. Най-често като критерий за това се използва отношението на задържащите $tg\varphi \sum_{i=1}^{n} P_i \cos\alpha_i + \sum_{i=1}^{n} c_i l_i$ към свличащите сили $\sum_{i=1}^{n} P_i \sin\alpha_i$. Така е и при метода на Фисенко, където коефициентът на устойчивост се определя посредством функцията

$$F(\gamma,\varphi,c) = \frac{tg\varphi \sum_{i=1}^{n} P_i \cos\alpha_i + \sum_{i=1}^{n} c_i l_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i \sin\alpha_i} . \tag{1}$$

При избрано разделяне на масива на блокове, анализа на израза (1) показва, че *F* е функция на обемното тегло (използва се при пресмятане на P_i), ъгъла на вътрешно триене и кохезията. Стойностите на тези величини се изменят в определени граници и често се приема, че имат в този интервал равномерно вероятностно разпределение, т. е. на равни дължини вероятностите остават едни и същи. При спазване на определени условия и фиксирани стойности на показателите γ_0, φ_0 и c_0, изчислителният метод на Фисенко и други, подобни на него, дават възможност с висока достоверност да се определи положението на плъзгателната повърхнина, т. е. повърхнината с минимална стойност $F_{\min}(\gamma_0, \varphi_0, c_0)$ на функцията (1), което значение е прието да се нарича коефициент на устойчивост.

Опитът показва, че $F_{\min}(\gamma_0, \varphi_0, c_0)$ приема граничните си стойности по-рядко и то за кратко време. Особено опасна е, разбира се, минималната стойност, която може да е под единица и е указание за предстоящ или вече настъпил процес на разрушаване. В преобладаващата част от случаите коефициента на устойчивост приема стойности от вътрешността на интервала на изменение.

От тук става ясно значението на това да се намерят минимума $\min F_{\min}(\gamma, \varphi, c)$ на коефициента на устойчивост и максимума $\max F_{\min}(\gamma, \varphi, c)$ на коефициента на устойчивост, при възможно изменение на изчислителните показатели в определените граници. Заедно с това е важно да се намерят и съответните повърхнини на плъзгане. Такава многомерна задача е трудно да се реши с традиционните средства на математиката. За целта могат да се използват съвременни методи за оптимизиране. В разглежданият случай целевата функция (1) е известна и могат да се приложат градиентни методи, методите на случайното търсене (Растригин, 1965; Вучков, 1986) и други.

За намирането на минимума $\min F_{\min}(\gamma, \varphi, c)$ и максимума $\max F_{\min}(\gamma, \varphi, c)$ на коефициента на устойчивост $F_{\min}(\gamma_0, \varphi_0, c_0)$ ще бъде използван метода на случайното търсене с обратна стъпка.

Идеята на метода ще бъде изложена за случая, когато се търси максимум на целевата функция $y = f(x_1, x_2, x_3)$ на три променливи, при ограничения $(x_i)_{\min} \le x_i \le (x_i)_{\max}, i = 1, 2, 3$. Често $x_i, i = 1, 2, 3$ се наричат управляващи параметри. За всеки от аргументите се приема стъпка на изменение на стойностите им, която е означена с $\Delta x_i, i = 1, 2, 3$.

Алгоритъмът за прилагане на метода на случайното търсене се свежда до последователност от следните стъпки:

1. Избира се начална точка $x^0(x_1^0, x_2^0, x_3^0)$, която удовлетворява условията $(x_i)_{\min} \le x_i^0 \le (x_i)_{\max}, i = 1, 2, 3$. Намира се стойността на целевата функция $y^0 = f(x^0)$ в тази точка. Обикновено за начална точка се избират средите на дефиниционните интервали на аргументите, т. е. $x_i^0 = 0{,}5[(x_i)_{\min} + (x_i)_{\max}], i = 1, 2, 3$. По-долу началната точка ще бъде означавана с x^k, при k=0. С буквата M ще бъде означен брояча на несполучливите стъпки. Тук той приема стойност 0, т. е. M=0. С n е означен броят на аргументите на целевата функция. За по-голяма прегледност бе прието n=3;

2. Генерират се числата $\beta_i, i = 1, 2, 3$. В редица програмни системи могат да се ползват генератори на равномерно разпределени в интервала [0, 1] числа. Ето защо тук се предполага, че с такъв генератор са получени случайните числа η_1, η_2, η_3. В следващи стъпки на алгоритъма се изисква случайните числа да са в интервала [-1, 1]. За целта се извършва трансформацията $\beta_i = 2(\eta_i - 0{,}5), i = 1, 2, 3$;

3. Намират се координатите на случайния вектор (ξ_1, ξ_2, ξ_3) по формулите:

$$\xi_i = \frac{\beta_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{3} \beta_i^2}}, i = 1, 2, 3.$$

Лесно се съобразява, че $\sum_{i=1}^{3} \xi_i^2 = 1$;

4. Прави се стъпка в случайно направление, при която от точка $x^k(x_1^k, x_2^k, x_3^k)$ се намира точка $x^{k+1}(x_1^{k+1}, x_2^{k+1}, x_3^{k+1})$ по формулите

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \Delta x_i . \xi_i, i = 1, 2, 3.$$

Проверява се дали са удовлетворени неравенствата

$$(x_i)_{\min} \le x_i^{k+1} \le (x_i)_{\max}, i = 1, 2, 3.$$

Ако неравенствата са изпълнени се преминава към точка 5 от алгоритъма. В противен случай стойността на брояча на несполучливи стъпки M се покачва с 1. Проверява се дали е изпълнено неравенството $M > 2^n + 4$. Ако е изпълнено, търсенето на максимума на целевата функция е приключено и се преминава към точка 8 от алгоритъма;

5. Получава новата стойност $y^{k+1} = f(x^{k+1})$ на целевата функция Сравняват се стойностите $y^k = f(x^k)$ и $y^{k+1} = f(x^{k+1})$. Ако е изпълнено неравенството $f(x^{k+1}) > f(x^k)$, то стъпката е сполучлива и се преминава към точка 2 от алгоритъма. При несполучлива стъпка се преминава към точка 6 от алгоритъма;

6. Прави се обратна стъпка по формулите

$$x_i^{k+1} = x_i^k - \Delta x_i . \xi_i, i = 1, 2, 3$$

и се получава новата стойност $y^{k+1} = f(x^{k+1})$ на целевата функция;

7. Сравняват се стойностите $y^k = f(x^k)$ и $y^{k+1} = f(x^{k+1})$. Ако е изпълнено неравенството $f(x^{k+1}) > f(x^k)$, то стъпката е сполучлива и се преминава към точка 2 от

алгоритъма. При несполучлива стъпка стойността на брояча M се покачва с 1; Проверява се дали е изпълнено неравенството $M > 2^n + 4$. Ако е изпълнено, търсенето на максимума на целевата функция е приключено и се преминава към точка 8 от алгоритъма;

8. Полученият резултат се съхранява на подходящ носител и/или се извежда на екрана на монитора.

За условията на мини „Марица изток" по изложения по-горе алгоритъм са направени изчисления за определяне положението на плъзгателната повърхнина в откривно стъпало, изградено от сини глини, при следните условия:

- височина на откривното стъпало 12*m*;
- ъгъл на откоса 53°;
- стойностите на физичните и якостни показатели са дадени в таблица 1. Използвани са традиционните означения γ , φ и c, съответно за обемна плътност, ъгъл на вътрешно триене и кохезия.

Таблица 1.
Стойности на физичните и якостни показатели

Означение	Минимална стойност	Максимална стойност	Средна стойност
$\gamma\,[t/m^3]$	$\gamma_{min} = 1{,}70$	$\gamma_{max} = 2{,}00$	$\bar{\gamma} = 1{,}85$
$\varphi\,[...^{\circ}]$	$\varphi_{min} = 5$	$\varphi_{max} = 8$	$\bar{\varphi} = 6{,}5$
$c\,[t/m^2]$	$c_{min} = 3$	$c_{max} = 6$	$\bar{c} = 4{,}5$

Задачата за определяне положението на плъзгателната повърхнина се формулира като:

- намиране на минимума $\min F_{min}(\gamma,\varphi,c)$ от възможните стойности на коефициента на устойчивост $F_{min}(\gamma_0,\varphi_0,c_0)$;

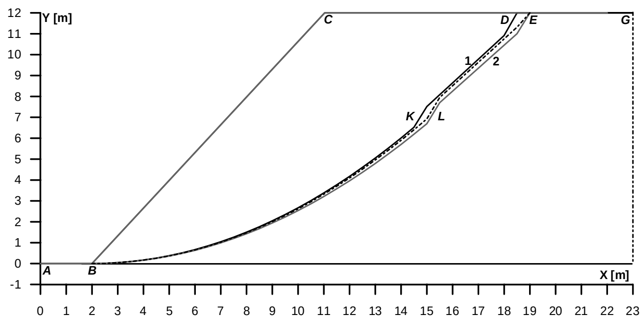
- намиране на максимума $\max F_{min}(\gamma,\varphi,c)$ от възможните стойности на коефициента на устойчивост $F_{min}(\gamma_0,\varphi_0,c_0)$,

т.е. намиране на интервала, в който най-вероятно се намира коефициента на устойчивост, при възможно изменение на изчислителните показатели в определените граници. На двете стойности $\min F_{min}(\gamma,\varphi,c)$ и $\max F_{min}(\gamma,\varphi,c)$ съответстват две плъзгателни повърхнини.

Съставена е компютърна програма, с помощта на която са получени и анализирани резултатите от решаването на редица задачи.

За задачата, представена по-горе, резултатите са илюстрирани графично на фигура 1. Плъзгателната повърхнина *BKD* съответства на минималната стойност $\min F_{min}(\gamma,\varphi,c) = 0{,}86$ на коефициента на устойчивост. Тя е получена при $\gamma = 1{,}71\,t/m^3$, $\varphi = 5{,}44^{\circ}$, $c = 5{,}96\,t/m^2$. Максималната стойност $\max F_{min}(\gamma,\varphi,c) = 1{,}75$ е намерена по плъзгателна повърхнина *BLE*, при което съответните значения на физичните и якостни показатели са $\gamma = 1{,}99\,t/m^3$, $\varphi = 7{,}06^{\circ}$, $c = 3{,}02\,t/m^2$.

Нека се предположи, както често се прави на практика, че за изчисляване устойчивостта на стъпалото се използват средните стойности $\bar{\gamma} = 1{,}85\,t/m^3$, $\bar{\varphi} = 6{,}5^{\circ}$, $c = 4{,}5\,t/m^2$ на показателите. Съответната плъзгателна повърхнина на фигура 1 е изобразена с пунктирана линия между линии *BLE* и *BKD*. Тогава коефициента на устойчивост се получава $F_{min}(\bar{\gamma},\bar{\varphi},\bar{c}) = 1{,}28$, т. е. стъпалото би трябвало да е в устойчиво състояние. Но ако, в рамките на зададените граници, съчетанията на стойностите на свойствата е такова, че $F_{min}(\gamma,\varphi,c) < 1$, както например при $\min F_{min}(\gamma,\varphi,c) = 0{,}86$, то стъпалото ще бъде в неустойчиво състояние! Това е напълно възможна ситуация с която са се срещали често специалистите в тази област.



Фиг. 1. **Плъзгателни повърхнини**: *BKD*, **при която** $\min F_{min}(\gamma,\varphi,c) = 0{,}86$; *BLE* **с коефициент на устойчивост** $\max F_{min}(\gamma,\varphi,c) = 1{,}75$; **с пунктир повърхнината, където** $F_{min}(\bar{\gamma},\bar{\varphi},\bar{c}) = 1{,}28$

Да се обърне внимание, че повърхнини 1 и 2 на фиг. 1 са получени при различни съчетания на стойностите на физичните и якостни показатели. Нека например скалите имат свойствата $\gamma = 1{,}99\,t/m^3$, $\varphi = 7{,}06^{\circ}$, $c = 3{,}02\,t/m^2$, с които е получена максималната стойност $\max F_{min}(\gamma,\varphi,c) = 1{,}75$ на коефициента на устойчивост. Ако при същите стойности на свойствата се намери коефициента на устойчивост, то съответната плъзгателна повърхнина отново ще бъде кривата *BLE*, с коефициент на устойчивост 1,75.

Плъзгателната повърхнина *BKD* отговаря на минималната стойност $\min F_{min}(\gamma,\varphi,c) = 0{,}86$, а *BLE* на максимума $\max F_{min}(\gamma,\varphi,c) = 1{,}75$ на коефициента на устойчивост $F(\gamma,\varphi,c)$ не при фиксирани стойности на изчислителните показатели, а при възможното им изменение в зададените в таблица 1 граници, т. е. със сигурност са изпълнени неравенствата

$$\min F_{min}(\gamma,\varphi,c) \le F_{min}(\gamma,\varphi,c) \le \max F_{min}(\gamma,\varphi,c) .$$

Решените примери дават основание да се заключи, че метода на случайното търсене може с успех да се прилага в редица практически задачи, където се търси екстремум на определена целева функция на много аргументи със зададени ограничения. При това е възможно, както целевата функция, така и ограниченията да са нелинейни. С внимание трябва да се подхожда, когато предварително е известно, че при зададените ограничения, целевата функция има повече от един екстремум. Тогава е възможно да се попадне на един от тях, без да е достигнат глобалния екстремум. Нека се отбележи обаче, че този проблем стои и при почти всички други подобни методи. Например този недостатък притежават всички градиентни методи за търсене екстремум на функция. Това не намалява техните достойнства, тъй като дават възможност да се реши задачата на математическото оптимиране тогава, когато други методи или не могат да се приложат, или са неефективни.

Литература

Арсентиев, А. И., И. Ю. Букин, В. А. Мироненко. Устойчивость бортов и осушение карьеров. Москва, Недра, 1982.

Вучков, И. И др. Ръководство за лабораторни упражнения по математическо моделиране и оптимизация на технологични обекти. С., Техника, 1986

Мельников, Н. В., А. И. Арсентьев, Н. В. Архипов и др. Совоpшенствование методов проектирования и планирования горных работ в карьере. Ленинград, Наука, 1981

Панюков, П. Н. Инженерная геология. Москва, Недра, 1978.

Растригин, Л. А. Случайный поиск в задачах оптимизации многопараметрических систем. Рига, Зинатне, 1965.

Стоева П., П. Златанов., Е. Александрова. Устойчивост на откоси и отводняване в открити рудници и кариери. София, 2005.

Фисенко, Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М., “Недра”, 1965.

Христов С. Г. Устойчивост и отводняване на откосите в откритите рудници и кариери. София, 2000.

Препоръчана за публикуване от Катедра “Открито разработване на полезни изкопаеми и взривни работи ”, МТФ