



ASSESSMENT OF THE STABILITY OF THE PIT WALL USING THE CUBIC SPLINE METHOD AND THE SLOPE ANGLE OF THE PIT WALL TRAJECTORY

**Gulomjon M. Norov¹, Oybek J. Khudayberdiev²,
Safarboy Kh. Rakhmatov³, Maksud R. Mekhmonov⁴**

¹Researcher, Navoi State University Mining and Technologies, Navoi, UZBEKISTAN

²Researcher, Navoi State University Mining and Technologies, Navoi, UZBEKISTAN

³Researcher, Navoi State University Mining and Technologies, Navoi, UZBEKISTAN

⁴Researcher, Navoi State University Mining and Technologies, Navoi, UZBEKISTAN

ABSTRACT

This paper deals with the problem of determining the optimal shape of the board trajectory and the evaluation of the stability factor, in order to ensure the stability of the boards, increasing the safety of overburden mining in the process of open-cut mining. In determining the trajectory of the boarder the method of cubic splines is used. To apply this method, the length of the base of the quarry (or ledge) is divided into arbitrary n parts and in each partial segment is constructed corresponding cubic spline function, being combined, each curve in common, gives a general curve corresponding to the profile of the trajectory of the pit wall. Then the stability margin of the pit wall K is estimated, considering it as the ratio of the sum of the tangents of the angles φ_i , where $i = \overline{1, n-1}$, formed between the tangents to the curve at the points x_i , where $i = \overline{1, n-1}$, which serves as the trajectory of the pit wall, considering them as restraining forces, as well as the tangents of the angles $\varphi_i - \beta$, where β is the slip angle of the rock mass and the added $\text{tg}\beta$, which are shear forces.

KEY WORDS: scarp slopes, fracture, stability, board, optimal board trajectory, interpolation, spline function, cubic spline method, algebraic polynomial, stability margin, angle tangent, holding and shear forces.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТА КАРЬЕРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КУБИЧЕСКОГО СПЛАЙНА И УГЛА НАКЛОНА ТРАЕКТОРИИ БОРТА

Аннотация: В данной статье рассматривается задача об определении оптимальной формы траектории борта и оценка коэффициента запаса устойчивости, с целью обеспечения устойчивости бортов, усилении безопасности ведения вскрышных работ в процессе добычи полезных ископаемых открытым способом. При определении траектории борта используется метод кубических сплайнов. Для применения этого метода длина основания карьеры (или уступа) разбивается на произвольные n части и в каждом частичном отрезке строится соответствующая кубическая сплайн функция, будучи объединенная, каждая кривая в общую, даёт общую кривую, соответствующую профилю траектории борта карьеры. Далее оценивается коэффициент запаса устойчивости борта карьеры K , рассматривая его как отношение суммы тангенсов углов φ_i , где $i = \overline{1, n-1}$, образованных между касательными к кривой в точках x_i , где $i = \overline{1, n-1}$, которая служит траекторией борта карьеры, рассматривая их как удерживающих сил, а также тангенсов углов $\varphi_i - \beta$, где β - угол наклона скольжения горного массива и прибавленного $\text{tg}\beta$, которые являются сдвигающимися силами.

Ключевые слова: откосы уступов, разрушение, устойчивость, борт, оптимальная траектория борта, интерполяция, сплайн – функция, метод кубического сплайна, алгебраический многочлен, коэффициент запаса устойчивости, тангенс углов, удерживающие и сдвигающие силы.



Изучение различной литературы по горному делу, посвященной обеспечению устойчивости бортов карьеры показывает, что в этом направлении ведутся множество исследовательских разработок. Мировой опыт показывает, что обеспечение устойчивости бортов карьеры при вскрышных работ и добычи полезных ископаемых открытым способом, в основном ведутся трех направлениях [1-3], которые зависят от траектории бортов карьеры. Траектория бортов карьеры могут быть следующей форме: выпуклой, вогнутой или наклонной прямой. Вид бортов карьеры, при их разработке, зависит от многих факторов, таких например, структуры почвы, рельефа местности, способов ведения работы, наличии техники, персонала и т.д. В процессе определение траектории устойчивости бортов карьеры, естественно учитываются финансовые, материальные и другие расходы. Именно по этим критериям выбираются один из трех вышеуказанных видов траектории бортов карьеры. По затратным соображениям, при ведении вскрышных работ, наиболее выгодным является выпуклая форма траектории борта карьеры, если удастся выбрать более точного угла наклона борта. Но, учитывая вышеприведенных факторов, ведутся разработки в виде вогнутую или наклонную прямую форму бортов карьеры. Во всех формах определения траектории борта карьеры особое внимание уделяются на углах наклона борта, который является одним из важнейших параметров в процессе ведения открытых горных работ [4]. Учитывая этот факт, для определения траектории борта карьеры используем метод кубических сплайнов.

Идея использования метода сплайна кубической интерполяции [5-6] заключается в том, что разрабатываемый по проекту участок, как горизонтально, так и вертикально, произвольным образом разбиваются на несколько частей, горизонтально и вертикально. Обозначим эти отрезки по горизонтали через $[a; b]$, вертикальный отрезок как $[c; d]$. Разобьем отрезок $[a; b]$ точками $a = x_0, x_1, x_2, \dots, x_n = b$ и отрезок $[c; d]$ точками $c = y_0, y_1, y_2, \dots, y_2 = d$ на частичные отрезки. На каждом частичном отрезке $[x_i, x_{i+1}]$, где $i = \overline{0, n-1}$, определим кубический многочлен. Далее, полученные многочлены стыкуются, при определенных условиях, что в результате получим единую гладкую кривую линию, которая в итоге определяет искомую траекторию борта карьеры.

Пусть у нас имеются значения функции, измеренные в нескольких точках, возникает задача, как найти значения функции в промежуточных точках. Такая задача называется задачей *интерполяции* и часто возникает на практике. Например, в геологии проводится опробование месторождение и определяется концентрация полезных ископаемых в определенных точках, в этом случае, с помощью интерполяции можно оценить концентрацию в промежуточных точках. Список реальных примеров легко продолжить.

Перед нами стоит задача: наиболее точно определить вид этой функции по заданным значениям. Один из возможных подходов - прибегнуть к интерполяции сплайнами.

Используем полученные данные работы [7], в которой определены кубические сплайны.

Пусть в результате экспериментов, получена некоторая зависимость функции $y = f(x)$ от переменной x , в виде таблицы (таб. 1).

Таблица 1.

i	0	1	2	...	n
x	x_0	x_1	x_2	...	x_n
y	y_0	y_1	y_2	...	y_n

Таб.1. Зависимость функции $y = f(x)$ от переменной x , где i -номера точек, x -значения переменной, y -значения функции.



Используя данные из таблицы напишем общий вид кубического сплайна для номера i , где $i = \overline{0, n-1}$:

$$y_i = S_i(x_i) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3. \quad (1)$$

Предположим, что найдены все промежуточные сплайн функции, определяемые формулой (1). Тогда объединяя промежуточных сплайн функции, можно построить общую гладкую кривую, которая определяет искомую траекторию борта карьеры.

Теперь переходим к доказательству устойчивости этой траектории. На устойчивость отвалов существенное влияние оказывают угол наклона площадки основания отвала, обводненность пород основания и отвальных масс, технология формирования отвалов. Величину коэффициента запаса устойчивости откосов определяет ряд факторов, среди которых основными являются: надежность определения механических характеристик пород, т.е. угла внутреннего трения и сцепления [8].

Используя этот факт, оценим коэффициент устойчивости борта карьеры K , рассматривая его как отношение суммы тангенсов углов φ_i , где $i = \overline{1, n-1}$, образованных между касательными к кривой в точках x_i , где $i = \overline{1, n-1}$, которая служит траекторией борта карьеры, а также тангенсов углов $\varphi_i - \beta$, где β - угол наклона скольжения горного массива и прибавленного $tg\beta$, которые являются сдвигающимися силами, т.е. если принимать

$$K_{уд} = tg\varphi_1 + tg\varphi_2 + tg\varphi_3 + \dots + tg\varphi_{n-1} \text{ и}$$

$$K_{сд} = tg(\varphi_1 - \beta) + tg(\varphi_2 - \beta) + tg(\varphi_3 - \beta) + \dots + tg(\varphi_{n-1} - \beta) + tg\beta, \text{ то}$$

$$K = \frac{K_{уд}}{K_{сд}} = \frac{tg\varphi_1 + tg\varphi_2 + tg\varphi_3 + \dots + tg\varphi_{n-1}}{tg(\varphi_1 - \beta) + tg(\varphi_2 - \beta) + tg(\varphi_3 - \beta) + \dots + tg(\varphi_{n-1} - \beta) + tg\beta}. \quad (2)$$

Если принимать во внимание то, что $tg\varphi_i = S_i(x_i)$ и (1), тогда коэффициент запаса устойчивости K борта карьеры можно оценить по формуле

$$K = \frac{S_1(x_1) + S_2(x_2) + S_3(x_3) + \dots + S_{n-1}(x_{n-1})}{tg(\varphi_1 - \beta) + tg(\varphi_2 - \beta) + tg(\varphi_3 - \beta) + \dots + tg(\varphi_{n-1} - \beta) + tg\beta} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} S_i(x_i)}{\sum_{i=1}^{n-1} tg(\varphi_i - \beta) + tg\beta}. \quad (3)$$

Для устойчивости борта карьеры требуется выполнение условия $K > 1$. Выполнение этого условия обеспечивается если имеет место следующие:

- 1) $\varphi_1 > \varphi_2 > \dots > \varphi_{n-1}$, т.е. углы φ_i , где $i = \overline{1, n-1}$, образуют убывающую последовательность от подошвы до вершины карьера;
- 2) $\varphi_{n-1} > \beta$, т.е. наименьшее из углов φ_{n-1} всегда будет больше чем β - угла наклона скольжения горного массива.

На рисунке 1 проиллюстрировано полученная гладкая кривая $y = S(x)$, являющаяся траекторией борта карьеры, разбитая на n частей, углы φ_i , где $i = \overline{1, n-1}$, β - угол наклона скольжения горного массива.

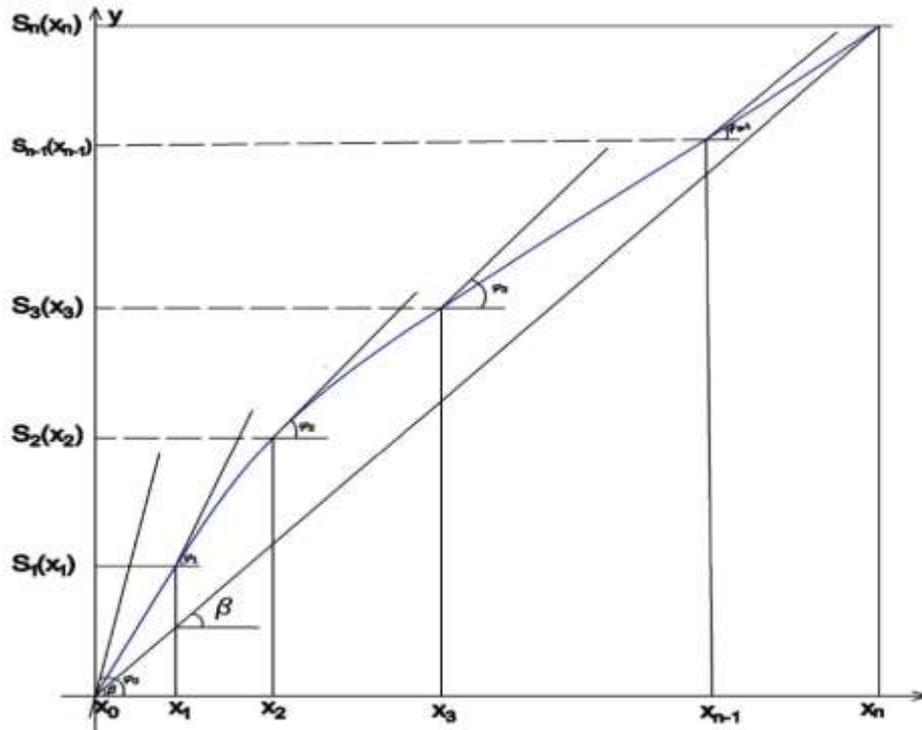


Рисунок 1. φ_i -углы образованные между касательными к кривой в точках $x_i, i = \overline{1, n-1}$ и осью Ox , -угол наклона скольжения горного массива.

Таким образом, здесь доказана следующая теорема.

Теорема. Если траекторией борта карьеры является выпуклой гладкой кривой $y = S(x)$, полученной в виде кубического сплайна, то при выполнении условий

1) $\varphi_1 > \varphi_2 > \dots > \varphi_{n-1}$, т.е. углы φ_i , где $i = \overline{1, n-1}$, образуют убывающую последовательность;

2) $\varphi_{n-1} > \beta$, т.е. наименьшее из углов φ_{n-1} всегда будет больше чем β – угла наклона скольжения горного массива, φ_i – углы образованные между касательными к кривой в точках x_i и осью Ox , то борт карьеры устойчив и коэффициент запаса устойчивости $K > 1$.

Проведенная для различных условий оценка необходимого коэффициента запаса устойчивости бортов показала, что в зависимости от надежности исходных данных и категорий он изменяется, как правило, в пределах 1,1–1,5 [8].

Для иллюстрации вышеприведенных фактов рассмотрим пример.

Пример: Найти коэффициент запаса устойчивости K борта карьеры, если $\varphi_1 = 70^\circ, \varphi_2 = 60^\circ, \varphi_3 = 48^\circ$ и угол наклона скольжения горного массива $\beta = 40^\circ$, (см. рис.2).

Решение: Для решения поставленной задачи используем формулу (2) (или (3)). Тогда

$$K = \frac{tg70^\circ + tg60^\circ + tg48^\circ}{tg(70^\circ - 40^\circ) + tg(60^\circ - 40^\circ) + tg(48^\circ - 40^\circ) + tg40^\circ} = \frac{tg70^\circ + tg60^\circ + tg48^\circ}{tg30^\circ + tg20^\circ + tg8^\circ + tg40^\circ} = \frac{2,747 + 1,732 + 1,110}{0,577 + 0,364 + 0,141 + 0,839} = \frac{5,589}{1,921} = 2,909 > 1.$$

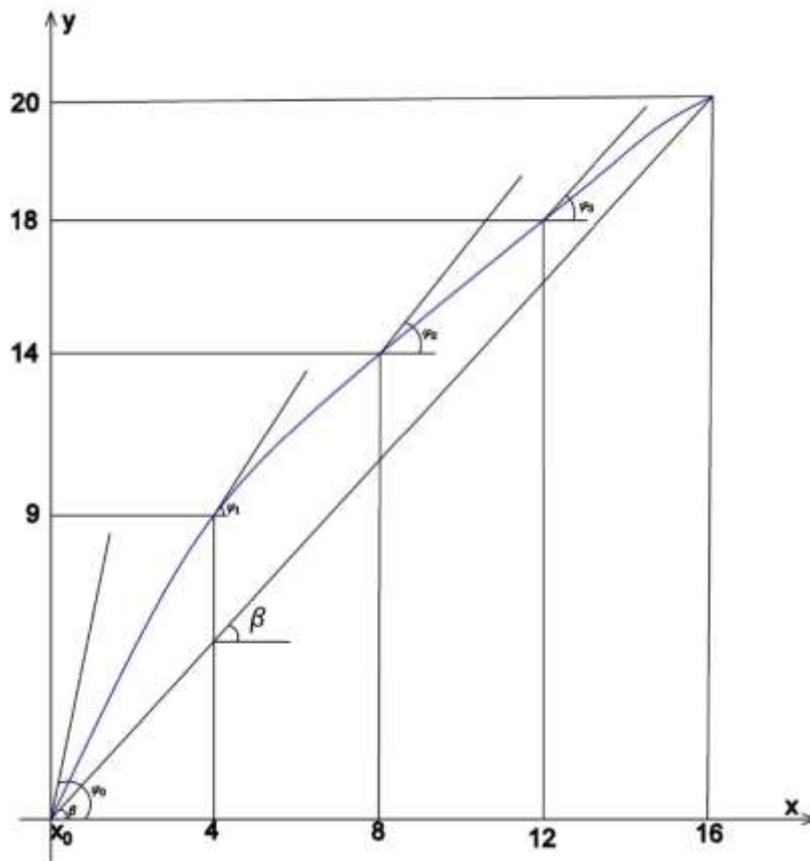


Рисунок 2. φ_i -углы образованные между касательными к кривой в точках $x_i, i = 1, 3$ и осью Ox , -угол наклона скольжения горного массива.

По результату решенной задачи следует, что если соблюдены условия теоремы, то коэффициент запаса устойчивости K борта карьеры удовлетворяет требованиям технического регламента по безопасности.

Вывод

Таким образом, для определения оптимальной траектории и оценки коэффициент запаса устойчивости K борта карьеры по предложенные методы кубического сплайна и нахождения значения КЗУ K борта карьеры, являются оправданными. Доказанная теорема подтверждает, что при соблюдении условия теоремы, полученные данные, т.е. траектория и оценка коэффициента K борта карьеры, будут наиболее эффективными и малозатратными способами.

Литература

1. Норов Ю.Д., Заиров Ш.Ш. Проектирование карьеров и обеспечение устойчивости бортов. – Монография. – Навои, Изд. «Навои», 2015. – 252 с.
2. Демин А.М. Устойчивость открытых горных выработок и отвалов. – М.: Недра, 1973. – 232 с.
3. Рыбин В.В. Развитие теории геомеханического обоснования рациональных конструкций бортов карьеров в скальных тектонически напряженных породах // Дисс. докт. техн. наук. – Апатиты, 2016. – 385 с.
4. Заиров Ш.Ш., Уринов Ш.Р., Тухташев А.Б. Теоретическое обоснование методов оценки устойчивости откосов трещиноватых пород // Научно-практический электронный журнал «ТЕСНика». – Нукус, 2020. №2. С. 50-55.
5. Стечкин С.Б., Субботин Ю.Н. Вычислительная математика. Сплайны в вычислительной математике. М.: Наука. 1976. 248 с.



6. <http://statistica.ru/branches-maths/interpolyatsiya-splaynami-teor-osnovy>.
7. Норов Г.М., Худайбердиев О.Ж., Рахматов С.Х., Мехмонов М.Р. Определение оптимальной траектории бортов карьеры методом кубических сплайнов. *Journal of the Cartographic Society of the Slovak Republic. Published in Cartographic letters 2023, Vol. 6, Issue 2. p. 225-238.*
8. А.А.Григорьев, Е.В.Горбунова, А.Н.Девяткина. Оценка устойчивости бортов карьеров (разрезов) и отвалов. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. – 37 с.
9. Ковров А.С. К 56 Устойчивость бортов карьеров в сложноструктурном массиве мягких пород: моногр. / А.С. Ковров. – Д.: Национальный горный университет, 2013. – 131 с.
10. Заиров Ш.Ш. Сборник лекций по дисциплине «Проектирование карьеров и обеспечение устойчивости бортов». – Навои, 2012. – 203 с.