

УДК 622.271.3:004.942

Молдабаев С.К., д-р техн. наук, профессор
(НАО «КазННТУ»),

Рысбайулы Б., д-р. физ.-мат. наук, профессор
(МУИТ),

Султанбекова Ж.Ж., канд. техн. наук,
Сарыбаев Н.О., бакалавр
(НАО «КазННТУ»)

СОЗДАНИЕ 3D МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ КРУТОПАДАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОКРУГЛОЙ ФОРМЫ

Молдабаев С.К., д-р техн. наук, професор
(НАО «КазНДТУ»),

Рисбайулы Б., д-р. физ.-мат. наук, професор
(МУИТ),

Султанбекова Ж.Ж., канд. техн. наук,
Сарибаев Н.О., бакалавр
(НАО «КазНДТУ»)

СТВОРЕННЯ 3D МОДЕЛІ РОЗВИТКУ ВІДКРИТОЇ РОЗРОБКИ КРУТОПАДАЮЧИХ РОДОВИЩ ОКРУГЛОЇ ФОРМИ

Moldabayev S.K., D.Sc. (Tech), Professor
(JSC “KazNRTU”),

Rysbaiuly B., D.Sc. (Fiz.-Mat.), Professor
(ITU),

Sultanbekova Zh.Zh., Ph.D. (Tech.),
Sarybayev N. O., B.D. (Tech.)
(JSC “KazNRTU”)

CREATING OF 3D MODEL OF OPEN-CAST MINING OF ROUND-SHAPE STEEP DEPOSITS

Аннотация. Рассматривается 3D модель поэтапных контуров карьера округлой или овальной формы с определенными углами наклона его бортов при разработке крутопадающих месторождений. Контур этапа отработки на каждом горизонте представляет собой замкнутую линию. После анализа цифровой модели месторождения определяется контур нулевого горизонта отработки. Устанавливается полярная точка нулевого горизонта. Назначается полярная ось. От полярной оси против часовой стрелки каждый раз отсчитывается полярный угол. Далее каждая дуга и поверхность контура заменяется сплайном. Таким образом, в математической модели учитывается совмещение рудного тела с поэтапным контуром карьера. В 3D модели поэтапных контуров карьера учитываются конфигурация рудного тела и наклон бортов карьера за счет применения по горизонтальным сечениям одномерного сплайна второго порядка, а при описании боковых поверхностей рудного тела - двумерного сплайна.

Ключевые слова: поэтапные контуры карьера, крутопадающие месторождения, 3D моделирование, режим горных работ, коэффициент вскрыши, одномерный и двухмерный сплайн.

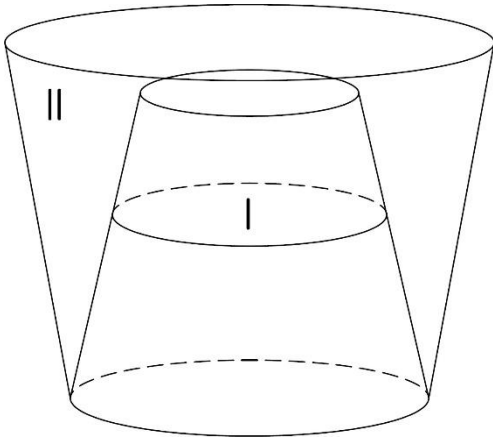
Предпосылки к созданию 3D модели. Исследования направлены на эффективную реализацию нового порядка формирования рабочей зоны относительно крутых бортов при разработке крутопадающих месторождений округлой (овальной) формы. Созданию динамической модели реализации новых технологий горных работ – отработки высоких уступов поперечными панелями с сооружением вскрывающих выработок на флангах карьерного поля [1, 2] и формирования фронта работ уступов рабочей зоны перпендикулярно фронту работ крутого рабочего борта [3] – предшествует 3D моделирование поэтапных контуров карьера. В отличие от разработки вытянутых месторождений на месторождениях округлой формы рабочая зона как бы обособляется от крутых бортов карьера и скользит по периметру бортов карьера сверху вниз [4]. На крутом борту оставляются только транспортные и предохранительные бермы. Угол наклона крутых бортов не превышает устойчивого их значения. При таком ведении горных работ обеспечивается безопасная эксплуатация мощных экскаваторно-автомобильных комплексов. Рабочая зона состоит из широких площадок. Ширина поперечных панелей зависит от производственной мощности карьера по горной массе. Оптимизация параметров панелей через оптимизацию конструкции бортов карьера по этапам отработки при разработке крутопадающих месторождений округлой формы ранее выполнена первоначально методом нелинейного программирования [5]. Сложности при подготовке громоздкого алгоритма при оптимизации режима горных работ с одновременным достижением равномерного распределения вскрываемых запасов руды на каждом этапе были исключены при решении задачи нелинейного программирования методом оптимального управления Беллмана в динамическом программировании [6]. Найденные новые подходы позволили автоматизировать процесс оптимизации режима горных работ [7].

Постановка задачи исследования. Теперь рассмотрим теоретические предпосылки вписывания боковых поверхностей поэтапных контуров карьера в цифровую модель рудной залежи в 3D модели (рисунок 1) для последующей оптимизации режима горных работ до выполнения горно-геометрического анализа. Через t обозначим номер этапа отработки. Тогда ведем следующие обозначения: $V_g(t)$ - объем вскрывших пород в контуре этапа отработки; $V_r(t)$ - объем руды (полезного ископаемого) в контуре этапа отработки. Предположим, что при $t = 0$ извлекаются только вскрывшие породы.

Выводим расчетную формулу вычисления объема $V_g(0)$ (рисунок 2).

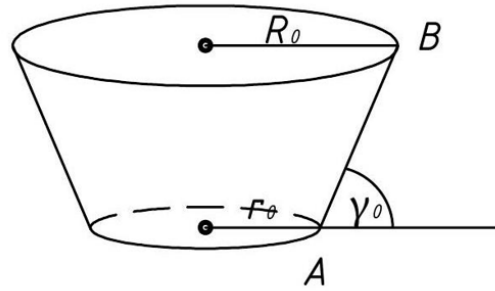
Прямая АВ является образующей поверхностью, полученной двумерным сплайном (поверхностный сплайн). Считаем, что прямая АВ вращается вокруг оси Oz и создает объем $V_g(0)$, то есть

$$V_g(0) = \pi \int_0^{h_0} x^2 dz. \quad (1)$$



I – рудная залежь произвольной формы; II – вскрышные породы

Рисунок 1 – Схема карьера при разработке месторождения округлой формы



R_0 – радиус контура нулевого этапа на дневной поверхности; r_0 – радиус контура нулевого этапа на глубине h_0 или радиус очищенной поверхности рудного тела

Рисунок 2 - Нулевой этап отработки месторождения при извлечении только вскрышных пород

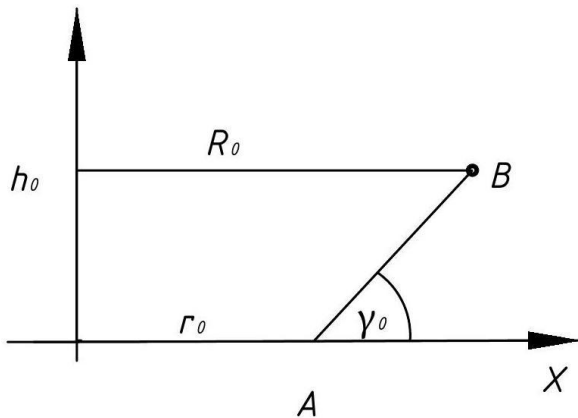
Запишем координаты точек: $A(r_0, 0)$, $B(R_0, h_0)$.

Тогда уравнение АВ записывается в виде

$$\frac{x - r_0}{R_0 - r_0} = \frac{z - 0}{h_0 - 0},$$

или

$$x = r_0 + (R_0 - r_0) \frac{z}{h_0}.$$



γ_0 – угол наклона рабочего борта

Рисунок 3 - Осевое сечение усеченного конуса, приведенное на рисунке 2

Из рисунка 3 ABC имеем равенство:

$$\frac{R_0 - r_0}{h_0} = \text{ctg}(\gamma_0).$$

В результате получим следующую формулу

$$x = r_0 + z \text{ctg}(\gamma_0).$$

Ее подставляем в интеграл (1), тогда:

$$V_g(0) = \pi \int_0^{h_0} (r_0 + z \text{ctg}(\gamma_0))^2 dz = \pi g(\gamma_0) \int_0^{h_0} (r_0 + z \text{ctg}(\gamma_0))^2 d(r_0 + z \text{ctg}(\gamma_0)).$$

Вычисляя интеграл, находим формулу:

$$V_g(0) = \frac{1}{3} \pi g(\gamma_0) \left[(r_0 + z \operatorname{ctg}(\gamma_0))^3 - r_0^3 \right].$$

Учитывая, что $r_0 + h_0 \operatorname{ctg}(\gamma_0) = R_0$, она преобразуется к виду

$$V_g(0) = \frac{1}{3} \pi g(\gamma_0) (R_0^3 - r_0^3) = V(0). \quad (2)$$

Оптимизация поэтапных объемов вскрышных пород и руды. Теперь рассмотрим произвольный этап разработки $t > 0$. Для этого обратимся к рисунку 4.

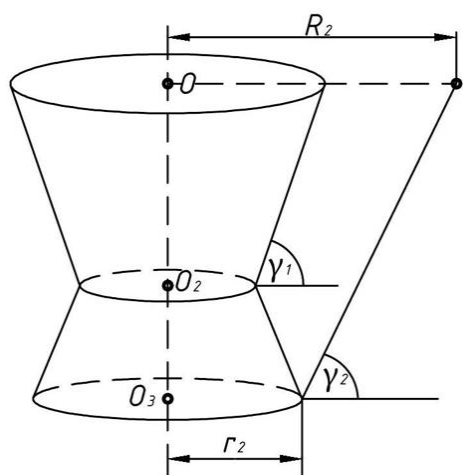


Рисунок 4 – Расположение усеченных конусов после первого этапа отработки, где нижний усеченный конус интерполирует объем полезного ископаемого

Введем еще обозначения: $OA = R_0$, $OB = R_1$, $O_1A_1 = r_0$, $O_1B_1 = r_1$, $\angle BB_2x = \gamma_1$.

На основе формулы (2) объем горной массы (вскрышных пород и руды), извлекаемый после этапа $t = 1$, определяется по формуле

$$V(1) = \frac{1}{3} \pi g(\gamma_1) (R_1^3 - r_1^3).$$

Теперь можно вычислить объем извлекаемой породы на 1-ом этапе отработки

$$V_p(1) = V(1) - V_p(0) - V_r(1).$$

Здесь объем извлекаемой руды на этом же этапе отработки

$$V_r(1) = \frac{1}{3} \pi g(\alpha_1) (r_1^3 - r_0^3).$$

Тогда коэффициент вскрыши на 1-ом этапе отработки составит

$$K_r(1) = \frac{V(1) - V_p(0) - V_r(1)}{V_r(1)}.$$

Рассмотрим случай, когда $t = 2$. Из схемы на рисунке 5 выводятся формулы:

$$V(2) = \frac{1}{3} \pi g(\gamma_2) (R_2^3 - r_2^3),$$

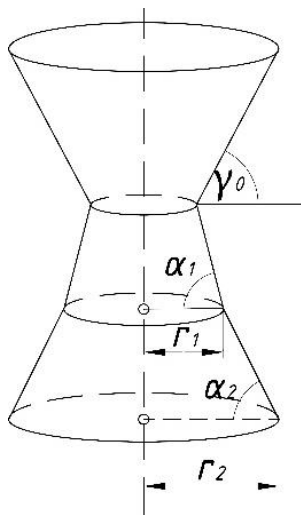


Рисунок 5 – Расположение усеченных конусов полезного ископаемого после второго этапа обработки (по построению $\alpha_1 > \alpha_2$, то есть поворот боковых поверхностей двух соседних конусов составляет $\alpha_1 - \alpha_2$)

$$V_r(2) = \frac{1}{3} \pi g(\alpha_2)(r_2^3 - r_1^3),$$

$$V_p(2) = V(2) - V_p(1) - V_r(2).$$

Это означает, что коэффициент вскрыши на этапе $t = 2$ определяется по формуле

$$K_r(2) = \frac{V(1) - V_p(0) - V_r(1)}{V_r(2)} = \frac{V_p(2)}{V_r(2)} \quad (3)$$

Используя математическую индукцию, устанавливается зависимость

$$K_r(t) = \frac{V(t) - V_p(t-1) - V_r(t)}{V_r(t)} = \frac{V_p(t)}{V_r(t)}, \quad (4)$$

где

$$V(t) = \frac{1}{3} \pi g(\gamma_t)(R_t^3 - r_t^3),$$

$$V_r(t) = \frac{1}{3} \pi g(\alpha_t)(r_t^3 - r_{t-1}^3), \quad (5)$$

$$V_p(t) = V(t) - V_p(t-1) - V_r(t),$$

$t = 1, 2, 3, \dots, n$

В работе [6] решена задача нахождения оптимального значения коэффициента вскрыши.

Используя введенные обозначения, оптимальный коэффициент вскрыши в 3D модели определяется по формуле

$$K_r^*(t) = \frac{V_p^*(t)}{V_r^*(t)}, \quad t = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Здесь

$$U^*(n-t+1) = \frac{V_p(n) - V_p^*(n-t)}{t},$$

$$V^*(n-t+1) = \frac{V_r(n) - V_r^*(n-t)}{t},$$

$$V_p^*(n-t+1) = V_p^*(n-t) + U^*(n-t+1),$$

$$V_r^*(n-t+1) = V_r^*(n-t) + V^*(n-t+1),$$

$$V_p^*(0) = V_g(0), \quad V_r^*(0) = 0.$$

Рассмотрим случай, когда внешняя форма области расположения полученного ископаемого интерполируется гиперболоидом вращения (рис. 6). Пусть $|OO_1| = H$.

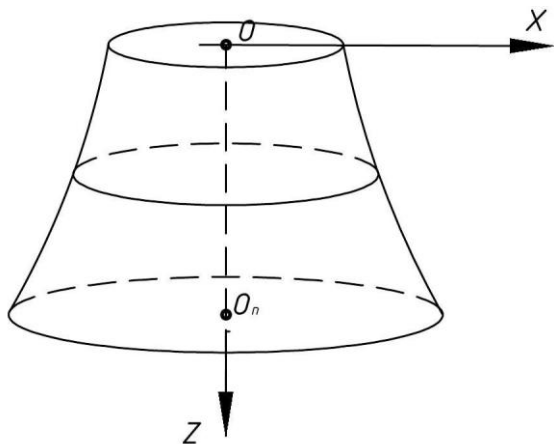


Рисунок 6 - Расположение усеченных конусов полезного ископаемого после n -ого этапа отработки, когда боковая линия интерполируется гиперболой (по построению $\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_n$)

Каноническое уравнение поверхности тела, приведенного на рисунке 6, имеет вид:

$$\frac{x^2}{a^2} = \frac{z^2}{c^2} + 1. \quad (6)$$

При $z = 0$ имеем, что $x = a = r_0$.

С другой стороны, при $z = H$ имеем равенство:

$$\frac{x^2}{r_0^2} = \frac{H^2}{c^2} + 1$$

или

$$\frac{r_n^2}{r_0^2} = \frac{H^2}{c^2} + 1, \quad \frac{H^2}{c^2} = \left(\frac{r_n}{r_0}\right)^2 - 1. \quad (7)$$

Вычислим объем фигуры, приведенной на рисунке 6:

$$V_r = \pi \int_0^H x^2 dz = \pi \int_0^H a^2 \left(\frac{z^2}{c^2} + 1 \right) dz = \pi \frac{a^2}{3} H \left(\frac{H^2}{3c^2} + 1 \right).$$

Учитывая (7), получаем объем:

$$V_r = \frac{1}{3} \pi H (r_n^2 + 2r_0^2).$$

В зависимости от формы поверхности тела можно получить различные формулы для определения V_r .

Теперь формулы оптимального значения $V_r^*(t), t = n-1, n-2, \dots, 1$ на каждом этапе отработки можно установить в объемной постановке задачи, т.е. все значения функции $V_r^*(t)$ вычисляются.

Используя формулу (6), вычисляется $V_r^*(t)$, т.е.:

$$V_r^* = \pi \int_{z_{t-1}}^{z_t} x^2(z) dz = \pi a^2 \int_{z_{t-1}}^{z_t} \left(\frac{z^2}{c^2} + 1 \right) dz = \pi a^2 \left(\frac{z^2}{3C^2} + z \right) \Big|_{z=z_{t-1}}^{z=z_t}.$$

Из последнего равенства получается уравнение:

$$\frac{z_t^3}{3C^2} + z_t = \frac{z_{t-1}^3}{3C^2} + z_{t-1} + \frac{1}{\pi a^2} V_r^*(t) \quad (8)$$

$$t = 1, 2, 3, \dots, n-1, n.$$

где z_t - мощность рудного тела на t -ом этапе обработки.

Установление оптимального значения радиуса контуров этапов обработки карьера.

Вводим функцию

$$f(z_t) = \frac{z_t^3}{3C^2} + z_t - \frac{z_{t-1}^3}{3C^2} - z_{t-1} - \frac{1}{\pi a^2} V_r^*(t).$$

Вычислим производные от функции $f(z_t)$. То есть

$$f'(z_t) = \frac{z_t^2}{C^2} + 1 > 0, \text{ возрастающая функция;}$$

$$f''(z_t) = \frac{2z_t}{C^2} > 0, \text{ вогнутая функция при } z_t > 0.$$

Точка $z_t = 0$ является точкой перегиба функции $f(z_t)$. Решение уравнения (8) осуществляется методом Ньютона.

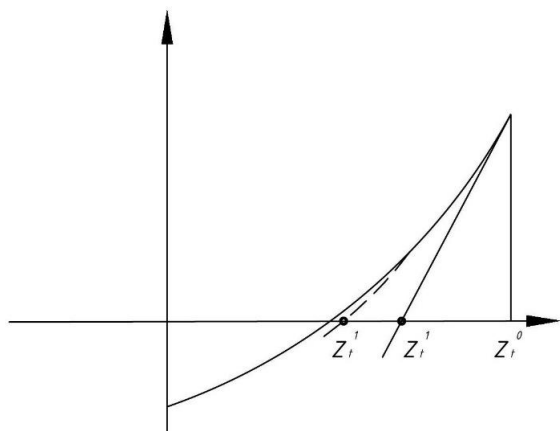
$$z_t^{k+1} = z_t^k - \frac{f\left(z_t^k\right)}{f'\left(z_t^k\right)}, \quad k = 0, 1, \dots$$

где z_t^0 - начальное приближение.

В нашем случае формула Ньютона записывается в виде

$$z_t^{k+1} = z_t^k - \frac{\left(z_t^k\right)^3 + 3C^2 z_t^k - \left(z_{t-1}^k\right)^3 - 3C^2 z_{t-1}^k - 3C^2 \frac{1}{\pi a^2} V_r^*(t)}{\left(z_t^k\right)^2 + C^2}.$$

В силу того, что функция $f(z_t)$ является вогнутой на отрезке $(0, +\infty)$, итерационный процесс вычисления z_i^k начинается с правой части (рисунок 7).



z_t^0 – начальное приближение, z_t^1 – следующее приближение, z_t^* – точное значение корня

Рисунок 7 - Приближение решения уравнения $f(z_t) = 0$ методом Ньютона, когда через несколько итераций достигается желаемая точность

В качестве начального приближения можно взять значение

$$z_t^0 = z_{t-1} + \sqrt[3]{\frac{3C^2}{\pi a^2} V_r^*(t)}.$$

После определения z_t по формуле (6) вычисляется радиус контура этапа обработки:

$$r^*(t) = x_t^* = \frac{a}{c} \sqrt{(z_t^*)^2 + c^2}, \quad t = 1, 2, \dots, N$$

На основе формулы (4) оптимальное значение коэффициента вскрыши записывается в виде

$$K_r(t) = \frac{V(t) - V_p(t-1) - V_r(t)}{V_r(t)}$$

где

$$V_p(t) = V(t) - V_p(t-1) - V_r(t)$$

или

$$\frac{1}{3} \pi g(\gamma_t)(R_t^3 - r_t^3) = \frac{1}{3} \pi g(\gamma_{t-1})(R_{t-1}^3 - r_{t-1}^3) + V_r(t) + V_p(t).$$

Из последнего уравнения определяется искомый радиус контура этапа обработки R_t при разработке крутопадающих месторождений округлой формы.

Заключение. Использование в 3D моделировании поэтапных контуров карьера при разработке крутопадающих месторождений округлой формы по горизонтальным сечениям одномерного сплайна второго порядка, а при описании боковых поверхностей рудного тела - двумерного сплайна позволило при оптимизации объемов вскрышных пород и руды, а также коэффициента вскрыши учитывать наклон бортов карьера по этапам обработки через установление на каждом из них оптимального радиуса контуров боковых поверхностей. Через оптимальные поэтапные объемы вскрышных пород и руды возможно установить положения контуров этапов обработки карьера относительно рудного тела для последующего создания его динамической модели. Полученные зависимости оптимизируют режим горных работ на цифровой модели месторождения до выполнения горно-геометрического анализа, что сократит количество исследуемых вариантов развития горных работ при проектировании карьеров.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Creating the effective implementation of double subbench mining technology / S.K. Moldabayev, B. Rysbaiuly, Zh.Zh. Sultanbekova, Ye.Aben // *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*. - CRC Press/Balkema, 2014. – pp. 351-356.
2. Innovative technology of expanding the boundaries of efficient application of the open cast mining method / B.R. Rakishev, S.K. Moldabayev, Ye. Aben [etc]// *Proceedings of the 23rd World Mining Congress, Montreal, Canada, (2013)*. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <file:///I:/wmc2013/pdfs/wmc2013Paper872.pdf>.
3. Equalization of traffic flows of benches in the working area benches with excavator-truck complexes / S.K. Moldabayev, Zh.Zh. Sultanbekova, Ye. Aben, I.Gumenik // *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*. - CRC Press/Balkema, 2014. – pp. 327-332.
4. Ways to achieve the optimal schedule of the mining mode of double subbench mining / S.K. Moldabayev, B.Rysbaiuly, Zh.Zh. Sultanbekova, Ye.Aben // *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*. - CRC Press/Balkema, 2014. – pp. 35-40.
5. Moldabayev, S.K. Justification of Countours Belonging to the Stages of Mining Steeply Dipping Deposits Using the Solution of the Problem of Nonlinear programming / S.K. Moldabayev, B.Rysbaiuly, Zh.Zh. Sultanbekova // *Proceedings of the 22nd MPES Conference. Mine Planning and Equipment Selection*. - Dresden, Germany, 2013. - pp. 125-132.
6. Moldabayev, S.K. Solution of nonlinear programming problem by Bellman method while optimizing the two-level mining of benches in deep open pits / S.K. Moldabayev, B.Rysbaiuly // *Theoretical and practical solutions of mineral resources mining*. - CRC Press/Balkema, 2015. – pp. 49-54.
7. Moldabayev, S.K. Automation of calculation of optimal parameters of two-level mining of benches with cross-section panels by excavator-auto truck complexes / S.K. Moldabayev, B.Rysbaiuly, Zh.Zh. Sultanbekova // *The 23rd International symposium on mine planning & erquiment selection*. – Johannesburg, South Africa, 2015. - pp. 1139-1146.

REFERENCES

1. Moldabayev, S.K., Rysbaiuly, B., Sultanbekova, Zh.Zh. and Aben, Ye. (2014), “Creating the effective implementation of double subbench mining technology”, *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, pp. 351-356.
2. Rakishev B.R., Moldabayev, S.K., Aben, Ye., Samenov, G. and Anafin, K.M. (2013), “Innovative technology of expanding the boundaries of efficient application of the open cast mining method”, *Proceedings of the 23rd World Mining Congress, Montreal, Canada*, available at: <file:///I:/wmc2013/pdfs/wmc2013Paper872.pdf>.
3. Moldabayev, S.K., Sultanbekova, Zh.Zh., Aben, Ye. and Gumenik, I. (2014), “Equalization of traffic flows of benches in the working area benches with excavator-truck complexes”, *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, pp. 327-332.
4. Moldabayev, S.K., Rysbaiuly, B., Sultanbekova, Zh.Zh. and Aben, Ye. (2014), “Ways to achieve the optimal schedule of the mining mode of double subbench mining”, *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, pp. 35-40.
5. Moldabayev, S.K., Rysbaiuly, B. and Sultanbekova, Zh. Zh. (2013), “Justification of Countours Belonging to the Stages of Mining Steeply Dipping Deposits Using the Solution of the Problem of Nonlinear programming”, *Proceedings of the 22nd MPES Conference. Mine Planning and Equipment Selection*. - Dresden, Germany, pp. 125-132.
6. Moldabayev, S.K. and Rysbaiuly, B. (2015), “Solution of nonlinear programming problem by Bellman method while optimizing the two-level mining of benches in deep open pits”, *Theoretical and practical solutions of mineral resources mining*, pp. 49-54.
7. Moldabayev, S.K., Rysbaiuly, B. and Sultanbekova, Zh. Zh. (2015), “Automation of calculation of optimal parameters of two-level mining of benches with cross-section panels by excavator-auto truck complexes”, *The 23rd International symposium on mine planning & erquiment selection*, Johannesburg, South Africa, pp. 1139-1146.

Об авторах

Молдабаев Серик Курашович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Горное дело» НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (НАО «КазНТУ»), Алматы, Республика Казахстан, moldabaev_s_k@mail.ru.

Рысбайулы Болатбек, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математики и компьютерного моделирования Международного университета информационных технологий (МУИТ), Алматы, Республика Казахстан, b.rysbaiuly@mail.ru.

Султанбекова Жанат Женсиқбаевна, кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Менеджмент» НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (НАО «КазННТУ»), Алматы, Республика Казахстан, jannety@mail.ru.

Сарыбаев Нуржігіт Омарович, бакалавр горного дела, магистрант кафедры «Горное дело» НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева» (НАО «КазННТУ»), Алматы, Республика Казахстан, nurzhigit@inbox.ru.

About the authors

Moldabayev Serik Kurashovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Professor in Department of Mining, Noncommercial Joint-stock Company “Kazakh National Research Technical University after K.I. Satpaev” (JSC “KazNRTU”), Almaty, Republic of Kazakhstan, moldabaev_s_k@mail.ru.

Rysbaiuly Bolatbek, Doctor Of Physics-Mathematics Sciences (D. Sc.), Professor, Chief in Department of “Mathematics and computer Modelling”, International University of Information Technologies (ITU), Almaty, Republic of Kazakhstan, b.rysbaiuly@mail.ru.

Sultanbekova Zhanat Zhensikbayevna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor in “Management” Department, Noncommercial Joint-stock Company “Kazakh National Research Technical University after K.I. Satpaev” (JSC “KazNRTU”), Almaty, Republic of Kazakhstan, jannety@mail.ru.

Sarybayev Nurgigit Omarovich, Bachelor of Sciences (B.Sc.), student of city council in Department of Mining, Noncommercial Joint-stock Company “Kazakh National Research Technical University after K.I. Satpaev” (JSC “KazNRTU”), Almaty, Republic of Kazakhstan, nurzhigit@inbox.ru.

Анотація. Розглядається 3D модель поетапних контурів кар'єра округлої або овальної форми з певними кутами нахилу його бортів при розробці крутопадаючих родовищ. Контур етапу відпрацювання на кожному горизонті являє собою замкнуту лінію. Після аналізу цифрової моделі родовища визначається контур нульового горизонту відпрацювання. Встановлюється полярна точка нульового горизонту. Призначається полярна вісь. Від полярної осі проти годинникової стрілки кожен раз відраховується полярний кут. Далі кожна дуга і поверхня контуру замінюється сплайном. Таким чином, в математичній моделі враховується поєднання рудного тіла з поетапним контуром кар'єра. В 3D моделі поетапних контурів кар'єра враховуються конфігурація рудного тіла і нахил бортів кар'єра за рахунок застосування по горизонтальних перетинах одновимірного сплайна другого порядку, а при зображенні бічних поверхонь рудного тіла - двовимірного сплайна.

Ключові слова: поетапні контури кар'єра, крутопадаючі родовища, 3D моделювання, режим гірничих робіт, коефіцієнт розкриву, одновимірний і двовірний сплайн.

Abstract. The article presents a 3D model of the staged contours of round and oval quarries with certain slopes of their sides formed during development of the steep deposits. In each horizon, a contour stage presents a close line. After analyzing the field digital model, a zero horizon contour is determined for future mining operations. Further, a polar point of the zero horizon and polar axis are assigned. Then, each time, a polar angle is counted counter-clockwise from the polar axis. Further, each arc and contour surface are replaced by a spline. Thus, the mathematical model takes into account alignment of the ore body with the pit staged contour. The 3D model of the staged quarry contour takes into account configuration of the ore body and slope of the pit walls by applying one-dimensional spline of the second order for the horizontal sections and two-dimensional spline for describing side surfaces of the ore body.

Keywords: quarry staged contours, steep deposits, 3D modeling, mining operation mode, stripping ratio, one-dimensional and two-dimensional spline.

Статья поступила в редакцию 18.10.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Четвериком М.С.